

**VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky**

**Simulace a měření atmosférických vlivů pro optický svazek
Simulation and Measurement of Atmospheric Effects for
Optical Beam**

2016

Bc. Lukáš Koritar

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Lukáš Koritar

Studijní program:

N2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor:

2601T013 Telekomunikační technika

Téma:

Simulace a měření atmosférických vlivů pro optický svazek
Simulation and Measurement of Atmospheric Effects for Optical Beam

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

Cílem předkládaného zadání diplomové práce je navrhnutí experimentálního pracoviště pro vyhodnocování a měření atmosférických vlivů na linkové kódy a modulační formáty pro optický svazek šířící se skrze speciální box. V boxu poté bude student provádět simulování atmosférických jevů (mlha, turbulence, teplotní zatížení a déšť). Nedílnou součástí práce bude i měření vlivů těchto atmosférických jevů na změnu polarizačních vlastností optického svazku.

1. Nastudujte a popište vlivy atmosférických jevů na optický svazek.
2. Proveďte analýzu používaných linkových kódů a modulačních formátů pro atmosférické optické komunikace.
3. Sestrojte experimentální pracoviště pro vyhodnocování a měření atmosférických vlivů na linkové kódy a modulační formáty pro optický svazek šířící se skrze speciální box.
4. Vytvořte simulační model experimentálního zapojení v softwarové aplikaci Optiwave a analyzujte simulovaná data.
5. Vyhodnoťte naměřené a simulované data.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] SALEH, B. E. A. *Základy fotoniky*. Praha: Matfyzpress, 1995. ISBN 80-85863-00-6
- [2] WILFERT, O., KOLKA, Z. *Statistical model of free-space optical data link*. In: Proc. of The International Symposium on Optical Science and Technology. Conference 5550. Denver: SPIE. 2004, p. 203-213.
- [3] WILFERT, O. *Optoelektronika*. Elektronické skriptum. Brno: FEKT VUT v Brně, 2008.
- [4] ANDREWS, L., PHILLIPS, R., HOPEN, C. *Laser Beam Scintillation with Applications*. Washington: SPIE Press, 2001.
- [5] SHIRAI, T.; DOGARIU, A.; WOLF, E. *Directionality of some model beams propagating in atmospheric turbulence*. Optics Letters, 2003, Vol. 28, No. 8, pp. 610-612. ISSN 0146-9592.
- [6] HENNIGER, H.; WILFERT, O. *An Introduction to Free-space Optical Communications*. Radioengineering. 2011, Vol. 19, No. 2, pp. 203-212. ISSN 1210-2512.
- [7] ANDREWS, L., C.; PHILLIPS, R., L.; HOPEN, C., Y.; ALHABASH, M., A. *Theory of optical scintillation*. Journal of the Optical Society of America A. 1999, Vol. 16, No. 6, p. 1417 – 1429. ISSN 0740-3232.
- [8] RICKLIN, J., C.; DAVIDSON, F., M. *Atmospheric turbulence effects on a partially coherent Gaussian beam: Implications for free-space laser communication*. Journal of the Optical Society of America A: Optics and Image Science, and Vision, 2002, Vol. 19, No 9, pp. 1794-1802. ISSN 1084-7529.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jan Látal**

Datum odevzdání: 29.04.2016



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou/diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: *21. dubna 2016*



.....
podpis studenta

Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Janu Látalovi za připomínky k obsahu diplomové práce, odbornou pomoc a především jeho drahocenný čas při konzultacích. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Aleši Vanderkovi a Ing. Lukáši Hájkovi za jejich odbornou pomoc.

Abstrakt

Diplomová práce je zaměřena na pokročilé modulační formáty PSK a QAM pro bezvláknový optický svazek, které jsou vytvářeny pomocí softwarově definovaného rádia USRP řízeného aplikacemi vytvořené v prostředí Labview za pomoci knihovny Radio modulation toolkit. Modulovaný bezvláknový svazek je vystaven atmosférickým jevům v simulační komoře (turbulence, déšť a mlha) a následně demodulován a analyzován opět pomocí USRP zařízení. Vliv atmosférických jevů na modulační formát je posuzován z hlediska parametru modulační chybovosti vyjádřené v jednotce dB a také graficky pomocí konstelačního diagramu. Kromě atmosférických vlivů na modulační formát je zkoumán tento vliv také na změnu polarizačního stavu (elipticity a azimutu) modulovaného optického svazku pomocí polarimetru.

Klíčová slova

AOS, FSO, optický svazek, atmosférické vlivy, modulace, PSK, QAM, USRP, Labview; MER, EVM, konstelační diagram, polarizace, elipticita, azimut

Abstract

This diploma thesis is aimed to advanced modulation formats PSK and QAM for optical beam. The modulations are created by using software defined radio USRP by applications in Labview. Modulated optical beam is exposed to atmospheric phenomena in the simulation box (turbulation, rain and fog) and then modulated optical beam is demodulated by using USRP. Effects of atmospheric phenomena to modulation format are evaluated via modulation error ratio (dB) and graphically via constellations diagram. Besides effects of atmospheric phenomena to modulation format are measured effects of atmospheric phenomena on change polarization state (ellipticity and azimuth) of optical beam by using polarimeter.

Key words

AOS, FSO, optical beam, atmospheric phenomena, modulation, PSK, QAM, USRP, Labview; MER, EVM, constellations diagram, polarization, ellipticity, azimuth

Obsah

Seznam použitých symbolů.....	- 1 -
Seznam použitých zkratk.....	- 3 -
Úvod.....	- 4 -
1 Optické atmosférické spoje.....	- 6 -
1.1 Historie.....	- 6 -
1.2 Princip.....	- 6 -
1.3 Výhody.....	- 7 -
1.4 Nevýhody.....	- 7 -
1.5 Využití AOS.....	- 7 -
1.6 Elektromagnetické spektrum.....	- 8 -
2 Optický svazek.....	- 9 -
2.1 Gaussovský svazek.....	- 9 -
2.1.1 Komplexní amplituda.....	- 10 -
2.1.2 Intenzita.....	- 11 -
2.1.3 Výkon.....	- 12 -
2.1.4 Poloměr svazku.....	- 12 -
2.1.5 Divergence svazku.....	- 13 -
2.1.6 Ohnisková hloubka.....	- 13 -
2.1.7 Fáze.....	- 13 -
2.2 Top hat, okrajový a středový svazek.....	- 14 -
3 Parametry pro vyhodnocení kvality spoje.....	- 15 -
3.1 Diagram oka.....	- 15 -
3.2 Bitová chybovost (BER).....	- 16 -
3.3 Poměr užitečného signálu od šumu (SNR).....	- 16 -
3.4 Q-faktor.....	- 16 -
4 Vliv atmosféry na AOS.....	- 18 -
4.1 Rozdělení a složení atmosféry.....	- 18 -
4.2 Výkonový rozpočet AOS spoje.....	- 19 -
4.3 Aerosoly.....	- 20 -
4.3.1 Beer-Lambertův zákon.....	- 20 -
4.4 Meteorologická viditelnost.....	- 20 -

4.5	Rozptyl	- 21 -
4.5.1	Rayleighův rozptyl	- 22 -
4.5.2	Mieův rozptyl	- 22 -
4.5.3	Neselektivní rozptyl	- 23 -
4.6	Absorpce	- 23 -
4.6.1	Atmosférická okna	- 23 -
4.7	Vliv počasí na útlum optického svazku	- 24 -
4.7.1	Vliv deště	- 24 -
4.7.2	Vliv sněhu	- 25 -
4.7.3	Vliv mlhy	- 26 -
4.8	Turbulence v atmosféře	- 27 -
4.8.1	Termická turbulence	- 28 -
4.8.2	Mechanická turbulence	- 28 -
4.8.3	Strukturní index lomu	- 29 -
4.8.4	Metoda určení útlumu vlivem turbulence	- 29 -
4.8.5	Vliv velikosti turbulentních vírů na optický svazek	- 30 -
5	Linkové kódy a modulace	- 32 -
5.1	Linkové kódy	- 32 -
5.1.1	NRZ	- 33 -
5.1.2	RZ	- 33 -
5.1.3	Diferenciální Manchester	- 33 -
5.2	Modulační techniky	- 33 -
5.2.1	On-Off Keying (OOK)	- 33 -
5.2.2	Pulzní polohová modulace (M-PPM)	- 34 -
5.2.3	Pulzní amplitudová modulace (M-PAM)	- 35 -
5.2.4	Fázová modulace (M-PSK)	- 35 -
5.2.5	Kvadrurní amplitudová modulace (M-QAM)	- 36 -
5.3	Kvalitativní parametry modulací	- 37 -
5.3.1	Parametr MER	- 38 -
5.3.2	Parametr EVM	- 38 -
6	Polarizace světla a její popis	- 39 -
6.1	Polarizace	- 39 -
6.1.1	Eliptická polarizace	- 39 -

6.1.2	Kruhová polarizace.....	- 40 -
6.1.3	Lineární polarizace.....	- 41 -
6.2	Stokesovy parametry.....	- 41 -
6.2.1	Ukázka zápisu polarizace pomocí Stokesových parametrů.....	- 42 -
6.3	Muellerova matice.....	- 43 -
6.4	Poincarého koule.....	- 43 -
6.4.1	Zobrazení jednotlivých typů polarizace na Poincarého kouli.....	- 44 -
7	Laboratorní box pro tvorbu dešťových kapek.....	- 45 -
7.1	Popis a schéma boxu.....	- 45 -
7.2	Součástky pro vytvoření.....	- 46 -
7.3	Ovládání pomocí programu v Labview.....	- 47 -
8	Měření vlivu atmosférických jevů na modulovaný svazek.....	- 49 -
8.1	Referenční klidné (bezturbulentní) prostředí.....	- 51 -
8.1.1	Testování hypotéz.....	- 53 -
8.2	Teplotní turbulence.....	- 57 -
8.2.1	Testování hypotéz.....	- 63 -
8.3	Simulace deště.....	- 72 -
8.3.1	Testování hypotéz.....	- 77 -
8.4	Mlha.....	- 81 -
8.4.1	Glycerinová mlha z mlhovače.....	- 82 -
8.4.2	Mlha vzniklá sublimací suchého ledu.....	- 86 -
9	Měření změny polarizace optického svazku působením atmosférických vlivů.....	- 91 -
9.1	Měření polarizace v referenčním klidném prostředí.....	- 91 -
9.1.1	Testování hypotéz.....	- 92 -
9.2	Vliv mechanických a teplotních turbulencí.....	- 93 -
9.2.1	Testování hypotéz.....	- 96 -
9.3	Vliv mlhy na změnu polarizace.....	- 99 -
9.3.1	Mlha vzniklá sublimací suchého ledu.....	- 99 -
9.3.2	Glycerinová mlha z mlhovače.....	- 102 -
9.4	Vliv deště.....	- 105 -
9.4.1	Testování hypotéz.....	- 106 -
10	Simulace v programu Optisystem.....	- 109 -
10.1	PSK modulace.....	- 109 -

Seznam použitých symbolů

10.1.1 Vlnová délka 650 nm	- 110 -
10.1.2 Vlnová délka 850 nm	- 112 -
10.2 QAM modulace.....	- 113 -
10.2.1 Vlnová délka 650 nm	- 114 -
10.2.2 Vlnová délka 850 nm	- 116 -
Závěr	- 118 -
Použitá literatura	- 122 -
Seznam příloh.....	- 125 -

Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotky	Význam symbolu
A	dB.km^{-1}	Útlum
a	m	Poloměr dešťové kapky
A(r)	-	Komplexní obálka
A₀	$\text{m}^{-2/3}$	Síla turbulence na úrovni terénu
c	m.s^{-1}	Rychlost světla
C_n²	$\text{m}^{-2/3}$	Strukturní parametr indexu lomu
e	C	Náboj elektronu
erfc(x)	-	Chybová funkce
h	m	Nadmořská výška
I(r)	W.m^{-2}	Intenzita optického záření
I₀	W.m^{-2}	Intenzita optického záření
i_h	A	Proud odpovídající log 1
i_l	A	Proud odpovídající log 0
k	m^{-1}	Vlnové číslo
L	m	Vzdálenost mezi přijímačem a vysílačem
M	-	Počet symbolů
m_e	-	Počet chybně přijatých bitů
N_a	m^{-3}	Koncentrace absorpčních částic
P	W	Výkon
P_{rmax}	dBm	Saturační výkon
P_{rmin}	dBm	Citlivost přijímače
Q	-	Q-faktor
R	cm.s^{-1}	Intenzita srážek
R(z)	m	Poloměr křivosti
R_b	bit.s^{-1}	Bitová rychlost
S	mm.h^{-1}	Množství sněhových srážek
T_b	s	Bitová perioda
t_m	s	Doba měření

Seznam použitých symbolů

$U(\mathbf{r})$	-	Komplexní amplituda
\mathbf{v}	m.s^{-1}	Rychlost větru
\mathbf{v}_a	m.s^{-1}	Rychlost srážek
V_m	km	Viditelnost
\mathbf{v}_t	bit.s^{-1}	Přenosová rychlost
$W(\mathbf{z})$	m	Pološířka svazku
w_0	m	Středová pološířka
z_0	m	Rayleighova vzdálenost
α_a	m^{-1}	Rozptyl na aerosolech
α_e	m^{-1}	Koeficient extinkce
α_m	m^{-1}	Molekulární rozptyl
β_a	m^{-1}	Absorpce na aerosolech
β_m	m^{-1}	Molekulární absorpce
β_{rmin}	m^{-1}	Rozptyl vlivem deště
ϵ_0	-	Dielektrická konstanta
$\zeta(\mathbf{z})$	rad	Fázové zpoždění
λ	m	Vlnová délka
λ_0	m	Přírodní frekvence molekuly
μ_0	-	Střední hodnota log 0
μ_1	-	Střední hodnota log 1
σ_0	-	Směrodatná odchylka log 0
σ_1	-	Směrodatná odchylka log 1
σ_a	m	Průměr absorpčních částic
Y_{opt}	-	Optimální hodnota rozhodovací úrovně

Seznam použitých zkratk

Zkratka	Význam
ANOVA	Analysis Of Variance
AOS	Atmosférické Optické Spoje
BER	Bit Error Rate
BPSK	Binary Phase Shift Keying
DAQ	Data Acquisition
DOP	Degree of Polarization
DQPSK	Differential Quadrature Phase Shift Keying
EVM	Error Vector Magnitude
FSO	Free Space Optics
H_A	Alternativní hypotéza
H₀	Nulová hypotéza
IR	Infra-Red
ISI	Intersymbol Interference
LD	Laser Diode
MER	Modulation Error Ratio
NRZ	Non Return to Zero
OOK	On Off Keying
PAM	Pulse Amplitude Modulation
PPM	Pulse Position Modulation
PSK	Phase Shift Keying
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RF	Radio Frequency
RZ	Return to Zero
SNR	Signal to Noise Ratio
USRP	Universal Software Radio Peripheral
VLC	Visible Light Communication
WDM	Wavelength Division Multiplex

Úvod

Práce se zabývá měřením atmosférických vlivů na modulační formát pro optický svazek, jenž je využit technologií zvanou jako atmosférické optické komunikace (zkratka AOS, často známá pod anglickým názvem FSO). Protože optické komunikace jsou na vzestupu především ve formě vláknové optiky, která v současnosti nahrazuje metalické sítě, tak i v oblasti rádiových komunikací se dostává do popředí bezvláknová optická technologie AOS. Nasazení AOS v sobě skrývá celou řadu výhod, jako jsou dostupné přenosové rychlosti vlivem velké šířky pásma, odolnost vůči elektromagnetickým interferencím a také bezlicenční pásmo, které je naopak u většiny mikrovlnných spojů placené. AOS mají několik specifikací, jako jsou spoje pro venkovní použití, ale také pro vnitřní použití (technologie zvaná VLC). Bohužel tyto spoje mají jednu velkou nevýhodu a tou je přenosové médium v podobě atmosféry.

Atmosféra je nehomogenní a nestacionární prostředí. Dochází tak v čase k různým meteorologickým jevům, které mají nepříznivý vliv na optický svazek. Samotná atmosféra je složena z různých částic a s nadmořskou výškou mění svoje vlastnosti. Pro atmosféru jsou definována tzv. propustná okna, které mají pro danou vlnovou délku malý útlum a je možno toto okno využít pro komunikaci. V atmosféře se vykytují děje, které zapříčiňují rozptyl, absorpci a fluktuaci vlivem turbulencí. Na samotný optický svazek má také vliv i teplota, která ohřívá masy vzduchu, které začnou stoupat atmosférou a dochází tak ke změně indexu lomu, což zapříčiní odchýlení optického svazku. Tak jako u rádiových sítí je velkým problémem v atmosféře déšť, tak u optických bezvláknových spojů má největší vliv mlha, která vykazuje optickému svazku velký útlum.

Protože je snaha neustále zvyšovat přenosovou rychlost, dostávají se do popředí složitější vícecestavové modulace, které nahrazují často používané modulace jako je OOK. Protože vícecestavové modulace jsou pomocí jednoho symbolu schopny přenést více bitů, dochází tak k nárůstu přenosové rychlosti. Protože však tyto modulace mají více stavů, stávají se náchylnější na nepříznivé podmínky, které mohou zapříčinit záměnu těchto symbolů, což znamená nárůst bitové chybovosti. Proto je třeba tyto modulace testovat a najít vhodnou alternativu, která zvýší přenosovou rychlost, ale také bude odolnou v proměnlivém prostředí.

V první části této práce je teoretický úvod do problematiky atmosférických optických spojů. Jsou popsány výhody, nevýhody a použití této technologie. Ve druhé kapitole je popsán optický svazek a jeho nejtypičtější profil ve formě Gaussova svazku. Třetí kapitolou jsou parametry, kterými je možno vyhodnotit kvalitu optického spoje. Ve čtvrté kapitole je uveden popis atmosféry a jednotlivých vlivů, které negativně působí na optický svazek. Pátá kapitola se zabývá popisem využívaných v optických komunikacích a také popisem základních linkových kódů. Poslední teoretickou kapitolou je polarizace světla a její popis. Tomuto tématu je také věnováno měření, a proto je nedílnou částí krátký teoretický popis, co je a jak lze popsat polarizaci světla.

V praktické části je nejprve popsán laboratorní box pro generování deště, který využívá průmyslových trysek. Byly použity tři druhy trysek, které se liší velikostí spektra kapek. Dále bylo zakoupeno několik komponent pro ovládání boxu, pro které je napsán ovládací program v prostředí Labview. Další část praktické části práce se zabývá měřením atmosférických vlivů na modulační formáty. Pro testování jsou použity čtyři PSK modulace a čtyři QAM modulace. Tyto modulace jsou

generovány za pomoci USRP zařízení. Jedná se o softwarově definované rádio, které je řízeno aplikací vytvořenou v Labview. Jsou měřeny vlivy teplotních turbulencí, deště a také mlhy. Mlha je generována za pomoci glycerinového mlhovače a sublimací suchého ledu. Z těchto měření je provedeno statistické vyhodnocení a testování hypotéz. Dalším měřením je měření změny polarizace optického svazku při působení stejných atmosférických vlivů. Poslední částí praktické části práce je simulace vytvořená v programu Optisystem od společnosti Optiwave. V simulaci jsou porovnány vícecestové modulace PSK a QAM modulace. Simulace je zaměřena na srovnání odolnosti vůči turbulencím a meteorologickým jevům zapříčiňující růst útlumu.

1 Optické atmosférické spoje

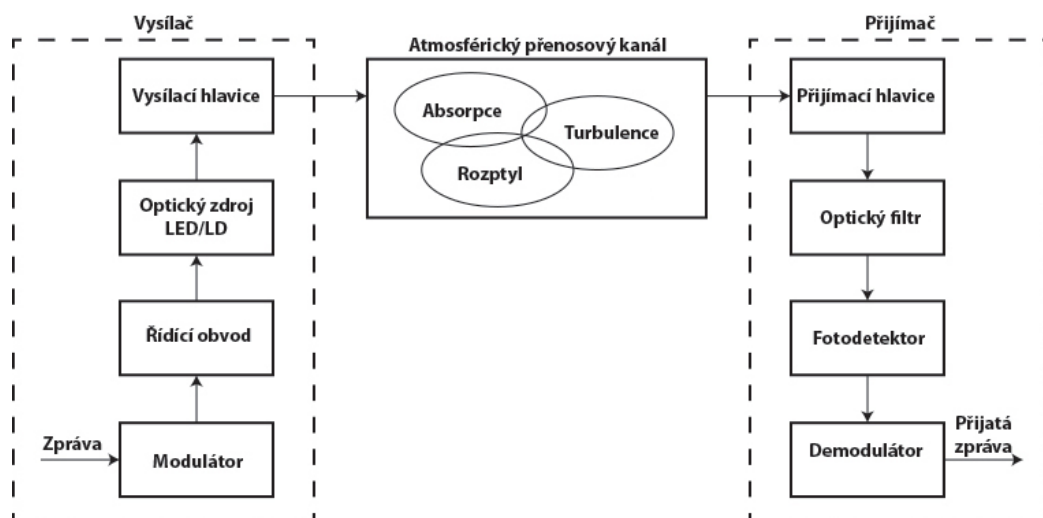
1.1 Historie

Atmosférickými optickými spoji (AOS, anglickým výrazem FSO – Free Space Optical Link) je myšleno komunikační zařízení využívající elektromagnetické vlnění, v oblasti vlnových délek definovaných jako světlo, k přenosu dat mezi dvěma body přes atmosférické prostředí.

Potřeba vzdáleně přenášet informace je přirozená reakce na život v komunitě. Už v dávných dobách byly použity primitivní metody na vzdálenou komunikaci. Takovým příkladem je použití světelného signálu reprezentovaného pochodní na věži ve Starověkém Řecku. Takto byly položeny základy komunikací na jednoduchém principu avšak prvním historickým zařízením, jenž používá optický svazek k přenosu informace, je datována do roku 1880 [1], kdy si jej nechal patentovat A.G. Bell s jeho spolupracovníkem Ch. S. Tainterem. Toto zařízení nazvali „photophone“. Zdrojem světla bylo Slunce, které ozařovalo systém zrcadel. Jedno ze zrcadel mělo funkci modulátoru vychylované lidským hlasem a způsobovalo tak změny optické intenzity na přijímací straně, kde byly tyto změny výkonu přeměněny na elektrický proud a za pomoci sluchátek přeměněny zpět na lidský hlas.

1.2 Princip

AOS technologie se může navenek jevit jako obdoba rádiové bezdrátové technologie, avšak po bližším zkoumání je podobná optickým kabelovým spojmům. Nevyužívá však optického kabelu, ale jako přenosové médium je použita atmosféra, kterým se optický paprsek šíří. Proto se tak někdy můžeme setkat s označením bezdrátová optika. Jako nosič energie je světlo, které může být ve spektru viditelného či neviditelného záření. Avšak ne všechny vlnové délky jsou pro tuto komunikaci vhodné. Protože v atmosféře nastává mnoho dějů, které ovlivňují šířící se paprsek je nutno volit určité vlnové délky, na které tyto jevy působí co nejméně. Více o atmosféře a jevech v ní bude věnována samostatná kapitola.



Obrázek 1.1: Schéma AOS řetězce[2]

Na obrázku 1.1 je zobrazen přenosový řetězec AOS systému. Principem je přeměna elektrického signálu vystupující z kodéru na optický signál, který je poté modulován modulací používanou pro optické signály (např. OOK, BPSK a další) a optickým zdrojem, nejčastěji laserovou diodou, je vyzařován světelný paprsek skrze atmosféru. Jak bylo již zmíněno, v atmosférickém kanále na signál působí řada rušivých elementů a optický signál je určitým způsobem degradován a je utlumen. Na přijímací straně je světelný paprsek detekován fotodetektozem, demodulován a následně přeměněn zpět do elektrické podoby signálu, který se dále zpracovává v dekodéru.

Využití optického atmosférického spoje je vhodné využít tam, kde by byla pokládka optického kabelu příliš náročná, finančně nedostupná popřípadě by byla komunikace optickým vláknem neefektivní. Tyto optické spoje jsou plně duplexní zařízení, využívající laserový zdroj, popřípadě i LED diody na kratší vzdálenosti. Mezi vysílačem a přijímačem je potřebná přímá viditelnost. Maximální možná vzdálenost mezi komunikujícími zařízeními je řádově do 10 km, avšak stabilita a kvalita závisí na aktuálních podmínkách. Optický spoj nabízí také vysokou ochranu proti odposlechu. Šířící se paprsek je v případě použití IR světla lidským okem neviditelný a šířka takového paprsku je úzká. V případě, kdy by se někdo pokusil o odposlech, došlo by mezi vysílačem a přijímačem k výpadku spojení, a tak pomocí obvodu detekce ztráty signálu můžeme tento odposlech zjistit.[3]

1.3 Výhody

Mezi výhody AOS systémů můžeme zařadit:[4]

- Vysoké přenosové rychlosti
- Imunita vůči elektromagnetickým interferencím
- Bezpečnost (nelze detekovat pomocí RF spektrálního analyzátoru, velmi úzký směrový paprsek)
- Neviditelné a lidskému oku bezpečné
- Žádné Fresnelovy zóny
- Nízké náklady ve srovnání s vláknovou optikou
- Bezlicenční pásmo v porovnání s RF komunikacemi

1.4 Nevýhody

Mezi nevýhody patří: [4]

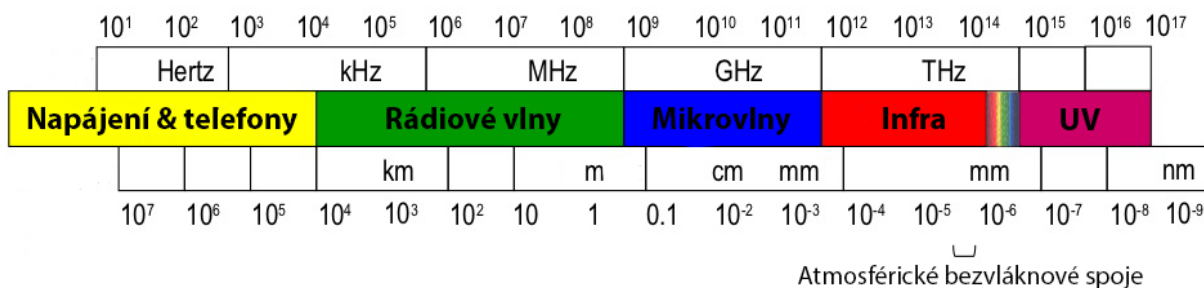
- Disperze paprsku
- Atmosférické jevy, které zapříčiňují útlum (mlha, déšť, sníh, turbulence)
- Interference se zdroji záření v pozadí (Slunce)
- Vzdálenost komunikace ve srovnání s vláknovou optikou

1.5 Využití AOS

- Telekomunikační a počítačové sítě
- Point to Point LOS (Line Of Sight – přímá optická viditelnost) alias bod-bod spoje
- Armádní aplikace
- Záložní linky

1.6 Elektromagnetické spektrum

AOS technologie využívá části elektromagnetického spektra vlnových délek v infračervené oblasti (viz obrázek 1.2). V optických komunikacích je nyní také využíváno viditelného spektra v oblasti aplikací zvané VLC (Visible Light Communication), což je technologie obdobná AOS pro vnitřní použití. V infračerveném spektru existuje několik přenosových oken mezi 780 nm a 1600 nm, které jsou využívány pro AOS. [4]



Obrázek 1.2: Elektromagnetické spektrum [4]

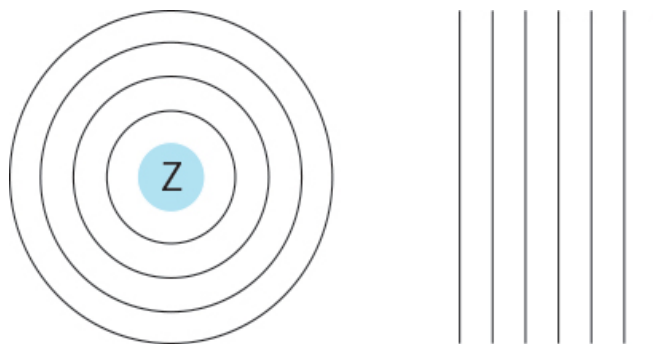
Většina AOS systémů je určena pro provoz v pásmu 780 – 850 nm nebo 1520 – 1600 nm. První z těchto pásem je nejpoužívanější spektrum. Je to dáno vlivem snadné dostupnosti zařízení a komponent při zachování poměrně nízkých nákladů na těchto vlnových délkách. Druhé pásmo, okolo 1550 nm, je atraktivní z hlediska kompatibility vlnových délek, které jsou použity ve WDM sítích. Dále také pro bezpečnost na lidské oko (na těchto vlnových délkách může být přenášeno více energie než v 780 nm pásmu) a také snížení záření v pozadí vlivem slunečních paprsků a menší náchylnost na útlum vlivem mlhy. Naproti tomu je vyšší cena komponent a mírně snížená citlivost detektoru. [2]

2 Optický svazek

Energie, která nese informaci napříč přenosovým médiem (atmosférou) v AOS technologii, je soustředěna do tzv. optického svazku. Optický svazek se k přenosu informace využívá nejen v bezvláknových komunikacích, ale také především ve vláknových komunikacích, které jsou v dnešní době největší prioritou a nahrazují starší metalické sítě.

Existují různé profily optického svazku, ale nejvíce používaným profilem je Gaussovský svazek, který bude v této kapitole popsán. Gaussovský svazek lze dále tvarovat. Takovýmto příkladem je svazek typu Top hat.

Ve vlnové optice máme vlny, které podle [5] představují dva opačné extrémy úhlového a prostorového omezení. U rovinné vlny jsou normály vlnoplochy (paprsky) rovnoběžné se směrem šíření a nedochází tak k žádné úhlové divergenci. Naproti tomu sférická vlna se šíří z jediného bodu (zdroje) a její normály k vlnoploše se rozbíhají do všech směrů (viz následující obrázek 2.1).

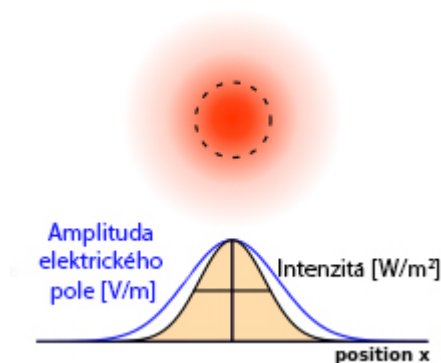


Obrázek 2.1: Vlevo sférická a vpravo rovinná vlna

Vlny, jejichž normály vlnoploch svírají s osou šíření malý úhel, se nazývají paraxiální vlny. Tyto vlny musí splňovat paraxiální Helmholtzovu rovnici. Řešením této rovnice s vlastnostmi optického svazku je vlna nazývána Gaussovský svazek. Výkon tohoto svazku je soustředěn do úzkého kužele. Intenzita je rozložena kruhově symetrickou gaussovskou funkcí s osou v ose svazku. Šířka této funkce je minimální v místě maximálního zúžení svazku, tj. v jeho středu a dále se postupně zvětšuje na obě strany. Blízko středu jsou vlnoplochy téměř rovinné. Pak se dále postupně zakřivují, až se stanou ve velké vzdálenosti přibližně sférickými. Pro danou šířku svazku poskytuje řešení vlnové rovnice minimální úhlovou divergenci normály k vlnoploše, které vytváří v prostoru úzký svazek. Existují také další řešení Helmholtzovy rovnice, které vedou ke svazkům Hermiteovské-Gaussovské svazky (H-G), Laguerreovské-Gaussovské (L-G) či Besselovské svazky. [5]

2.1 Gaussovský svazek

Na obrázku 2.2 je zobrazen profil tohoto svazku. Takový tvar svazku má za určitých ideálních podmínek záření vystupující z laseru. Jak již bylo zmíněno, matematický popis Gaussovského svazku vychází z řešení paraxiální Helmholtzovy rovnice. Gaussovský svazek je také základním módem tzv. TEM_{00} u svazků typu H-G a L-G.



Obrázek 2.2: Gaussovský profil svazku[8]

2.1.1 Komplexní amplituda

Dle literatury [5], paraxiální vlna je rovinná vlna matematicky popsána jako $\exp(-jkz)$ (s vlnovým číslem $k=2\pi/\lambda$ a vlnovou délkou λ) modulována komplexní obálkou $A(r)$. Pro komplexní amplitudu platí následující vztah:

$$U(r) = A(r) \exp(-jkz) \quad (2.1)$$

Aby pro komplexní amplitudu $U(r)$ byla splněna Helmholtzova rovnice $\Delta^2 U + k^2 U = 0$, musí být komplexní obálka $A(r)$ řešením paraxiální Helmholtzovy rovnice:

$$\Delta_T^2 A - j2k \frac{\partial A}{\partial z} = 0 \quad (2.2)$$

Kde: $\Delta_T^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$ je příčná část Laplaceova operátoru. Jednoduchému řešení paraxiální Helmholtzovy rovnice vyhovuje například paraboloidní vlna

$$A(r) = \frac{A_1}{z} \exp\left(-jk \frac{\rho^2}{2z}\right), \quad \rho^2 = x^2 + y^2 \quad (2.3)$$

Pro x a y mnohem menší než z , je paraboloidní vlna paraxiální aproximací sférické vlny $U(r) = \frac{A_1}{r} \exp(-jkr)$.

Gaussovský svazek je dalším řešením rovnice (2.2). Lze ho získat aproximací z paraboloidní vlny. Protože komplexní obálka paraboloidní vlny je řešením rovnice (2.2), pak také obálka posunutá o hodnotu ξ je řešením

$$A(r) = \frac{A_1}{q(z)} \exp\left(-jk \frac{\rho^2}{2q(z)}\right), \quad q(z) = z - \xi, \quad (2.4)$$

Kde: ξ je konstanta. Jedná se tak o paraboloidní vlnu v bodě $z = \xi$ namísto v $z = 0$. Pokud je ξ komplexní, rovnice (2.4) je stále řešením rovnice (2.2), ale získává jiné vlastnosti. Zejména když ξ je ryze imaginární, např. $\xi = -jz_0$, kde z_0 je reálné, pak (2.4) definuje komplexní obálku Gaussovského svazku:

$$A(r) = \frac{A_1}{q(z)} \exp\left(-jk \frac{\rho^2}{2q(z)}\right), \quad q(z) = z + jz_0. \quad (2.5)$$

Parametr z_0 je nazýván jako Rayleighova vzdálenost (označováno také z_R).

Pro oddělení amplitudy a fáze této komplexní obálky zapíšeme komplexní funkci $1/q(z)=1/(z+jz_0)$ pomocí její reálné a imaginární části, přičemž jsou definovány dvě nové reálné funkce $R(z)$ a $W(z)$

$$\frac{1}{q(z)} = \frac{1}{R(z)} - j \frac{\lambda}{\pi W^2(z)}. \quad (2.6)$$

Funkce $W(z)$ a $R(z)$ popisují pološířku svazku a poloměr křivosti jeho vlnoplochy. Rovnice (2.8-9) vyjadřují $W(z)$ a $R(z)$ jako funkce z a z_0 . Komplexní amplitudu $U(r)$ Gaussovského svazku lze získat dosazením rovnice (2.6) do (2.5) a využitím (2.1):

$$U(r) = A_0 \frac{W_0}{W(z)} \exp \left[-\frac{\rho^2}{W^2(z)} \right] \times \exp \left[-jkz - jk \frac{\rho^2}{2R(z)} + j\zeta(z) \right] \quad (2.7)$$

Kde: $A_0 = A_1/jz_0$.

Parametry svazku:

$$W(z) = W_0 \left[1 + \left(\frac{z}{z_0} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2.8)$$

$$R(z) = z \left[1 + \left(\frac{z_0}{z} \right)^2 \right] \quad (2.9)$$

$$\zeta(z) = \arctan \frac{z}{z_0} \quad (2.10)$$

$$W_0 = \left(\frac{\lambda z_0}{\pi} \right)^{1/2} \quad (2.11)$$

Kde: $W(z)$ je pološířka svazku, $R(z)$ je poloměr křivosti, $\zeta(z)$ je fázové zpoždění a W_0 je středová pološířka.

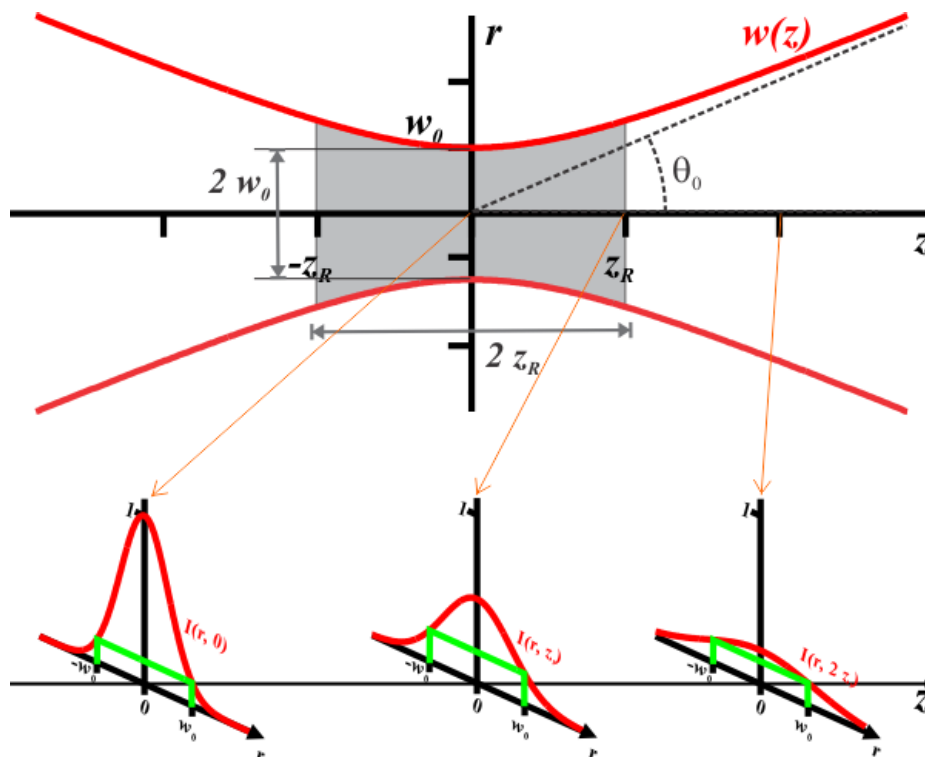
Z předešlých rovnic (2.7-11) se určí vlastnosti Gaussovského svazku, které budou popsány v následujících podkapitolách.

2.1.2 Intenzita

Intenzita optického záření $I(r) = |U(r)|^2$ je funkcí axiální vzdálenosti z a radiální vzdálenosti $\rho = (x^2 + y^2)^{1/2}$,

$$I(\rho, z) = I_0 \left[\frac{W_0}{W(z)} \right]^2 \exp \left[-\frac{2\rho^2}{W^2(z)} \right], \quad (2.12)$$

Kde: $I_0 = |A_0|^2$. Pro každou hodnotu z je intenzita gaussovskou funkcí radiální vzdálenosti ρ . Proto je vlna nazývána Gaussovským svazkem. Gaussova funkce dosahuje největší hodnoty pro $\rho = 0$ (na ose z) a monotónně klesá se vzrůstajícím ρ . Pološířka Gaussovského rozložení $W(z)$ přitom roste s axiální vzdáleností z , viz následující obrázek (obrázek 2.3). [5]



Obrázek 2.3: Normovaná intenzita jako funkce vzdálenosti ρ pro různé axiální vzdálenosti[9]

2.1.3 Výkon

Přenášený výkon svazku je dán integrálem ze součinu intenzity záření a plochy příčného průřezu svazku:[5]

$$P = \int_0^\infty I(\rho, z) 2\pi\rho d\rho, \quad (2.13)$$

Odkud

$$P = \frac{1}{2} I_0 (\pi W_0^2) \quad (2.14)$$

Výkon svazku je dán poloviční hodnotou součinu maximální intenzity s plochou kruhu o poloměru rovnající se středové pološířce svazku. Protože Gaussovské svazky jsou často charakterizovány přenášeným výkonem P , je vhodné vyjádřit intenzitu svazku I_0 jako funkci výkonu P prostřednictvím rovnice (2.14) následovně:[5]

$$I(\rho, z) = \frac{2P}{\pi W^2(z)} \exp\left[-\frac{2\rho^2}{W^2(z)}\right] \quad (2.15)$$

2.1.4 Poloměr svazku

V každém příčném průřezu svazku je největší intenzita vždy na ose z a v radiální vzdálenosti $\rho = W(z)$ poklesne na $1/e^2 \approx 0,135$ největší hodnoty. Protože 86% výkonu se šíří v oblasti o poloměru $W(z)$, bereme tento parametr jako poloměr svazku (někdy označován jako pološířka svazku či šířka svazku). Vztah závislosti poloměru svazku na z je uveden v rovnici (2.8). V rovině $z = 0$ nastává minimum hodnoty W_0 . Toto místo se nazývá jako místo maximálního zúžení a tedy jako střed svazku, kde W_0 je jeho poloměr. Průměr $2W_0$ je označován jako velikost stopy. Se vzrůstající hodnotou z vzrůstá poloměr svazku a pro hodnotu $z = z_0$ dosahuje hodnoty $\sqrt{2}W_0$. [5]

2.1.5 Divergence svazku

Při velké vzdálenosti od středu svazku ($z \gg z_0$) roste jeho poloměr přibližně lineárně se vzdávající se vzdáleností z a vytváří tak kužel s vrcholovým úhlem 2θ . V tomto kuželu se šíří přibližně 86% výkonu. Úhel divergence svazku je dán následujícím vzorcem:[5]

$$\theta_0 = \frac{2\lambda}{\pi 2W_0} \quad (2.16)$$

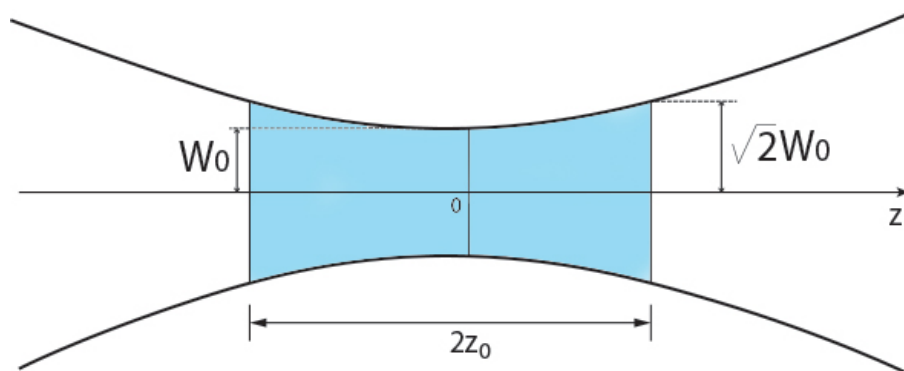
Divergence svazku je tak přímo úměrná podílu vlnové délky a středového průměru svazku. Menší středový poloměr vyžaduje větší divergenci.

2.1.6 Ohnisková hloubka

Protože je svazek nejužší v místě $z = 0$, má také v této rovině nejlepší ohnisko. Od něj se na obě strany svazek rozšiřuje. Do vzdálenosti na ose z , podél které je poloměr svazku menší nebo roven hodnotě $\sqrt{2}W_0$ (tj. tam, kde je plocha průřezu svazku menší nebo rovna dvojnásobku plochy minimálního průřezu), je označována jako ohnisková hloubka nebo také konfokální parametr (viz Obrázek 2.4:). Ohnisková hloubka je rovna dvojnásobku Rayleighovy vzdálenosti: [5]

$$2z_0 = \frac{2\pi W_0^2}{\lambda} \quad (2.17)$$

Ohnisková hloubka je přímo úměrná ploše průřezu svazku v místě maximálního zúžení a nepřímo úměrná vlnové délce. Fokusujeme-li svazek do menší stopy, získáme kratší ohniskovou hloubku.



Obrázek 2.4: Ohnisková hloubka [5]

2.1.7 Fáze

Fáze Gaussovského svazku má následující matematický popis: [5]

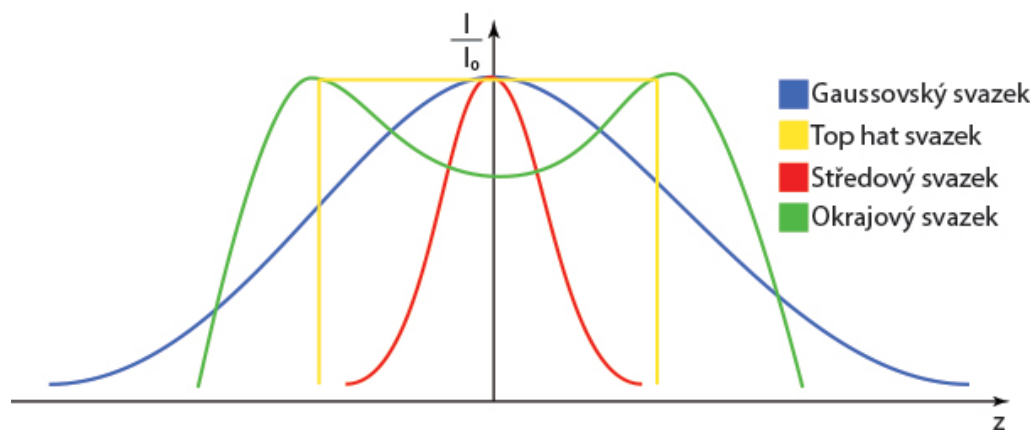
$$\phi(\rho, z) = kz - \zeta(z) + \frac{k\rho^2}{2R(z)} \quad (2.18)$$

První člen rovnice (2.18) je fází rovinné vlny, druhý člen popisuje fázové zpoždění, viz rovnice (2.10), měnící se od $-\pi/2$ do $+\pi/2$, viz následující obrázek. Toto fázové zpoždění odpovídá zpoždění vlnoplochy svazku vzhledem k rovinné nebo sférické vlně. Celkové zpoždění je podél osy svazku dosahuje hodnoty π .

2.2 Top hat, okrajový a středový svazek

Mezi další tvary svazku patří svazek typu Top hat. Tento svazek má v ideálním případě konstantní rozložení optické intenzity uvnitř kruhové stopy. Top hat svazek je možné vytvořit pomocí čoček a difrakčních prvků ze svazku s Gaussovským profilem. Mezi výhody tohoto svazku patří větší odolnost proti fluktuacím vlivem tupějšího profilu oproti Gaussovskému svazku.[6][7]

Okrajový svazek je typ svazku, který soustřeďuje svou intenzitu a výkon na okraji optické vlny v prstenci okolo osy šíření. Tento typ svazku se uplatňuje při tzv. otvorové vadě čočky. Opakem okrajového svazku je svazek středový, který svou intenzitu a výkon soustřeďuje do úzkého kužele. Na následujícím obrázku je srovnání výše zmíněných svazků.[6]



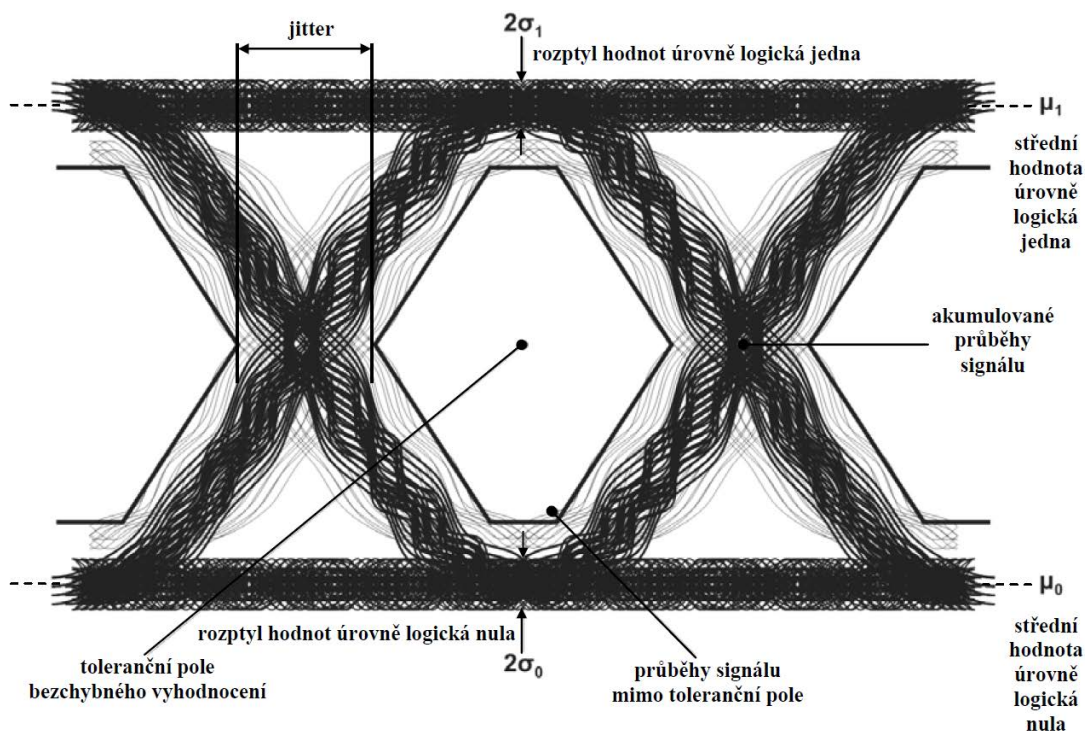
Obrázek 2.5: Srovnání profilů různých typů svazku[6]

3 Parametry pro vyhodnocení kvality spoje

Níže budou popsány parametry, díky kterým lze zhodnotit kvalitu přenosu atmosférického spoje. Aby byl daný spoj funkční, musí splnit určité kritéria, a to především hodnotu bitové chybovosti (BER), která se odvíjí od dalších parametrů či typu použité modulace. Na kvalitu spoje má všeobecně vliv použitých součástek, jako je typ zdroje či detektoru, díky kterým můžeme například zvýšit překlenutelnou vzdálenost daného spoje. Kromě parametru BER, můžeme také testovat kvalitu spoje pomocí technik na vyšších vrstvách RM-OSI modelu, jako je RFC 2544, ve kterých testujeme například propustnost, ztrátovost či zpoždění, či ITU-T Y.1564.

3.1 Diagram oka

Diagram oka (obrázek 3.1) je zobrazení pro kvalitativní analýzu vlivu komunikačního kanálu na tvar přenášeného signálu. Z diagramu oka lze odhadnout např. vliv šumu, jitter (zpoždění) či mezisymbolovou interferenci (ISI). Tento diagram získáme pomocí osciloskopu. Základními parametry, které se na tomto diagramu určují, jsou otevření a šířka oka. Otevření oka je charakterizováno vzdáleností mezi logickými úrovněmi log 1 a log 0. Čím více je oko otevřeno, tím menší je pravděpodobnost záměny logické úrovně. Šířka oka je vzdálenost mezi krajními polohami impulzů. Čím je tato vzdálenost větší, tím dovoluje systému tolerantnější výběr místa pro vzorkování aktuální logické hodnoty. Chyba nastane, pokud je oko téměř zavřené, nebo když je okamžik vzorkování posunut v důsledku fázového neklidu popřípadě, když rušení přesáhne rozhodovací úroveň. Tyto chyby jsou popsány parametrem bitové chybovosti.[10]



Obrázek 3.1: Diagram oka[10]

3.2 Bitová chybovost (BER)

Chybovost je obecně dána poměrem chybně přenesených elementů digitálního signálu k celkovému počtu přenesených elementů. Hodnota chybovosti určuje kvalitu spoje, a proto se snažíme vždy dosáhnout, co nejmenší hodnoty BER pro spolehlivou komunikaci. Pro určité služby a technologie jsou postačující různé hodnoty BER (pro optické linkové systémy alespoň $BER=10^{-9}$, avšak v případě použití samoopravných kódů lze provozovat systémy s hodnotou $BER=10^{-3}$).

Bitová chybovost je většinou dána poměrem chybně přijatých bitů vůči celkovému počtu bitů nebo lze také vyjádřit tímto vztahem:[11]

$$BER = \frac{m_e}{v_t * t_m} \quad (3.1)$$

Kde: m_e je počet chybně přijatých bitů, v_t je přenosová rychlost a t_m je doba měření.

3.3 Poměr užitečného signálu od šumu (SNR)

Bitová chybovost je závislá také na parametru odstupu signálu od šumu. Tento parametr je definován poměrem výkonu užitečného signálu P_S a výkonu šumu P_N . Měřením SNR je možné rychle odhadnout BER dané trasy, ale hodnota může být nepřesná, protože neuvažuje vliv následného zpracování signálu. Hodnota BER vyjádřená parametrem SNR je následovná:[10]

$$BER \approx \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{SNR}{2}} \right) \quad (3.2)$$

Kde: $\operatorname{erfc}()$ je chybová funkce dána vztahem $\operatorname{erfc}(x) = (2\pi)^{-\frac{1}{2}} \int_x^\infty \exp(-t^2) dt \approx \frac{e^{-x^2}}{\sqrt{\pi}x}$; funkce vrací hodnotu integrovanou mezi dolní integrační mezí x a nekonečnem, t představuje symbolickou proměnnou.

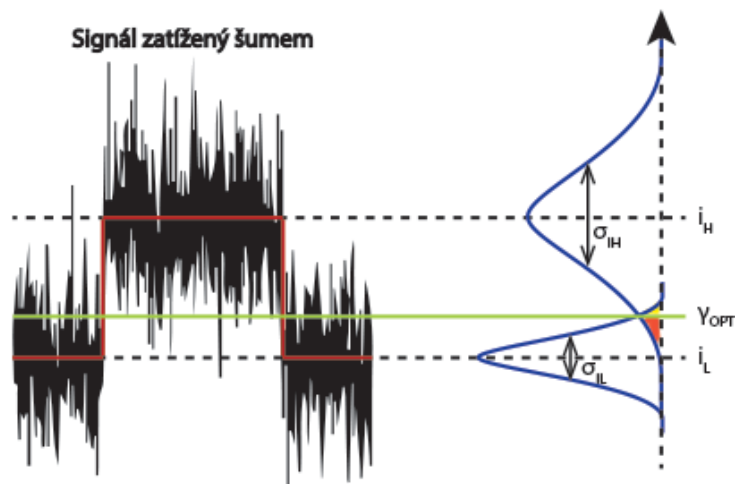
3.4 Q-faktor

Tento parametr vyjadřuje kvalitu digitálního signálu z analogového hlediska s ohledem na jeho odstup signálu od šumu (SNR). Čím větší hodnota Q-faktoru, tím je větší parametr SNR a z toho je patrná nižší hodnota BER. Výpočet Q-faktoru je dán následovně:[10][12]

$$Q = \frac{i_H - \gamma_{opt}}{\sigma_{iH}} = \frac{\gamma_{opt} - i_L}{\sigma_{iL}} = \frac{i_H - i_L}{\sigma_{iH} + \sigma_{iL}} \quad (3.3)$$

Kde: i_H je proud odpovídající úrovni optického výkonu na fotodetektoru pro úroveň $\log 1$, i_L je proud odpovídající úrovni $\log 0$, σ_{iH} je směrodatná odchylka úrovně $\log 1$, σ_{iL} je směrodatná odchylka úrovně $\log 0$ a γ_{opt} je optimální hodnota rozhodovací úrovně (viz obrázek 3.2), která je dána následovně:[12]

$$\gamma_{opt} = \frac{\sigma_{iL} i_H - \sigma_{iH} i_L}{\sigma_{iH} - \sigma_{iL}} \quad (3.4)$$



Obrázek 3.2: Parametry pro výpočet Q -faktoru[12]

Pomocí Q -faktoru lze vyjádřit chybovost BER následovně:[10]

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{Q}{\sqrt{2}} \right) \approx \frac{\exp \left(\frac{-Q^2}{2} \right)}{Q\sqrt{2\pi}} \quad (3.x)$$

Jak bylo již zmíněno, hodnota BER se dá přibližně určit pomocí parametru SNR nebo Q -faktoru. V následující tabulce jsou uvedeny hodnoty Q -faktoru a poměru SNR vzhledem k hodnotě BER.

Tabulka 3.1: Hodnota BER vzhledem k hodnotám Q -faktoru a SNR[10]

BER [-]	Q -faktor [-]	SNR [dB]
10^{-1}	1,282	2,155
10^{-2}	2,326	7,333
10^{-3}	3,090	9,800
10^{-4}	3,719	11,409
10^{-5}	4,265	12,598
10^{-6}	4,754	13,540
10^{-7}	5,199	14,319
10^{-8}	5,612	14,982
10^{-9}	5,998	15,560
10^{-10}	6,361	16,071
10^{-11}	6,706	16,529
10^{-12}	7,035	16,945

4 Vliv atmosféry na AOS

Je známo, že déšť, sníh, mlha či znečištění jsou atmosférickými jevy, které ovlivňují náš pohled na vzdálený objekt. Tyto jevy mohou také ovlivnit přenos elektromagnetického záření skrz atmosféru, zejména optické vlny.

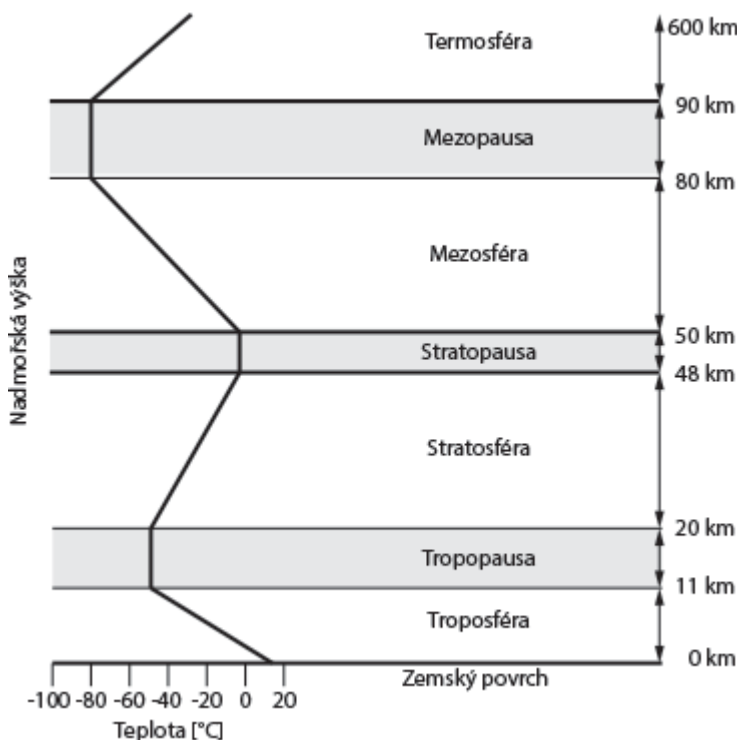
Mezi primární jevy, jež mají vliv na optické šíření vlny, jsou absorpce, rozptyl a fluktuace indexu lomu (optická turbulence). Absorpce a rozptyl vede zejména k útlumu optické vlny. Fluktuace indexu lomu vede k rozšíření optického svazku a ztrátám koherence optické vlny. Tyto účinky mají důsledky na optické komunikace využívající optických vln přenášených skrze atmosféru.

Vliv atmosférických jevů lze rozdělit na extinkci (extinkcí je myšlen dlouhodobý útlum vlivem absorpcí a rozptylů na molekulách), fluktuaci (kolísání výkonu) a krátkodobé přerušení svazku vlivem okolních předmětů zasahujících do dráhy optického svazku.[13]

4.1 Rozdělení a složení atmosféry

Atmosféra je plynný obal země, jenž má určité chemické složení měnící s nadmořskou výškou. Je složena z vody, aerosolu a čisté atmosféry. Atmosféra je rozdělena do vrstev (obrázek 4.1) podle nadmořské výšky, avšak tyto vzdálenosti nejsou pevné, ale jsou například různé v místech rovníku či blízkosti pólu Země. S měnící se nadmořskou výškou se mění teplota, tlak i hustota atmosféry. [13]

AOS systémy typicky pracují v části atmosféry zvané troposféra. Troposféra zasahuje přibližně do 11 km nad hladinou moře. Můžeme potkat také systémy pracující ve vyšších vrstvách, ale nejvíce AOS spojů nalezneme právě v oblasti troposféry.



Obrázek 4.1: Rozdělení atmosféry[14]

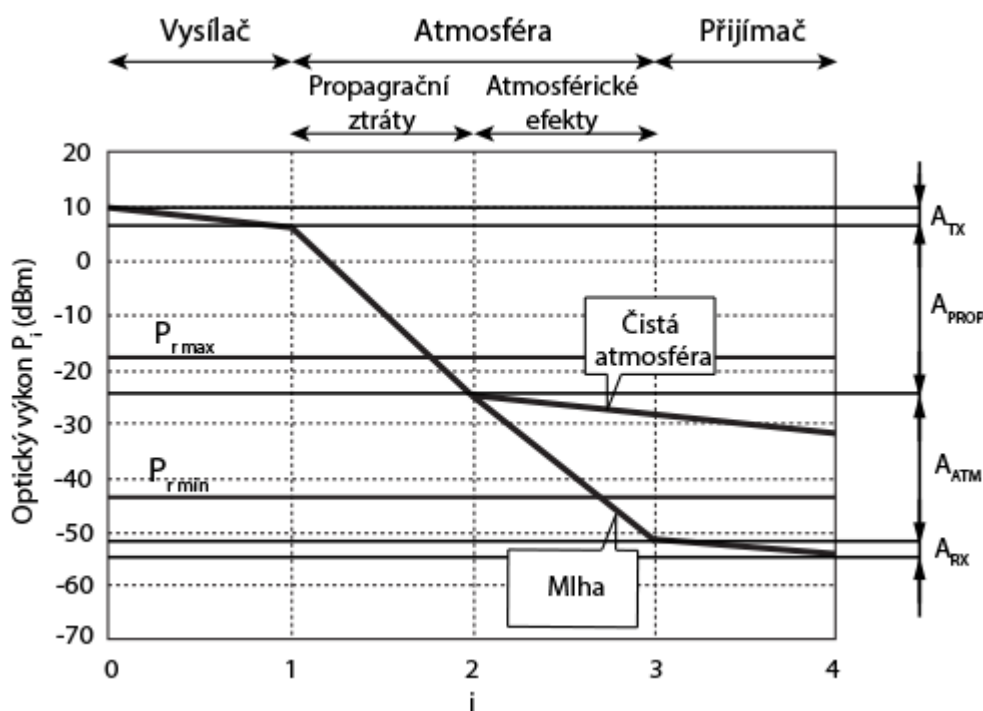
Troposféra obsahuje zhruba 75% zemské atmosférické hmoty. Maximální teplota vzduchu je v blízkosti zemského povrchu a následně klesá s nadmořskou výškou až do hranice troposféry a stratosféry, kde je teplota přibližně -55°C . [14]

V troposféře je velmi proměnlivé prostředí. Tvoří se zde mlhy, oblačnost, déšť, sníh či větrné turbulence a další jevy měnící se v čase a prostoru. Tyto jevy působí na přenosový kanál optického svazku a dochází tak k dějům, které ovlivňují kvalitu tohoto kanálu a dochází tak například ke kolísání výkonu a tím způsobené možné výpadky spoje či zvýšením parametru bitové chybovosti BER.

4.2 Výkonový rozpočet AOS spoje

Příklad výkonové úrovně AOS spoje je na obrázku 4.2, na kterém je znázorněn interval mezi dvěma sousedními body reprezentující pozorovatelný útlum mezi laserovou diodou na jedné straně a fotodetektořem na druhé straně. Je zřejmé, že přijatý optický výkon na fotodetektoru může být napsán ve formě:[15]

$$P_4 = P_0 - A_{TX} - A_{PROP} - A_{ATM} - A_{RX} \text{ [dBm]} \quad (4.1)$$



Obrázek 4.2: Příklad úrovně výkonového diagramu AOS spoje[15]

Pro úspěšnou detekci signálu, musí být výkon P_4 na aktivní oblasti fotodiody v intervalu ohraničeném citlivostí přijímače P_{min} a oblastí saturace P_{max} (minimální a maximální přijatý výkon pro daný BER). Jak můžeme z příkladu vidět, tak pro situaci, kdy byla v přenosovém prostředí mlha, tento požadavek není splněn. Naopak pokud je viditelnost atmosféry velká a bez mlhy, výkon splňuje požadavky pro úspěšnou detekci.

Z příkladu je zřejmé, že vlivy atmosféry mají vliv na výslednou kvalitu spoje a proto budou v následujících kapitolách tyto vlivy popsány.

4.3 Aerosoly

Aerosoly jsou velmi jemné částice (pevné – průmyslový prach nebo kapalné - mlha) v atmosféře s různou koncentrací a s velmi nízkou rychlostí pádu vlivem gravitace. Mají různý tvar a velikost (obecně mezi 0,01 až 100 μm). Aerosoly se mohou měnit v distribuci a koncentraci. Jako výsledek interakce aerosolů a světelného paprsku v závislosti na vlnové délce je atmosférický rozptyl a absorpce. Protože většina aerosolů je vytvořena na zemském povrchu (prachové částice, průmyslové částice...), je jejich největší koncentrace do mezní výšky zhruba 2 km. Se vzrůstající výškou koncentrace aerosolů rychle klesá. Ve vyšších nadmořských výškách se stává koncentrace, díky atmosférickým aktivitám a působení větru, prostorově konzistentní. Protože velikosti aerosolových částic jsou srovnatelné s vlnovou délkou používaných v AOS systémech, rozptyl na aerosolech popisuje tzv. Mieův rozptyl.[4][13]

Tabulka 4.1: Velikosti různých typů částic v atmosféře

Typ	Poloměr (μm)	Koncentrace (cm^{-3})
Molekuly vzduchu	10^{-4}	10^{19}
Aerosoly	10^{-2} až 1	10 až 10^3
Mlha	1 až 10	10 až 100
Dešťové kapky	10^2 až 10^4	10^{-5} až 10^{-2}
Sníh	10^3 až $5 \cdot 10^3$	N/A
Kroupy	$5 \cdot 10^3$ až $5 \cdot 10^4$	N/A

4.3.1 Beer-Lambertův zákon

Výsledek atmosférického útlu, jako efektu absorpce a rozptylu infračerveného světla na molekulách plynů a aerosolů přítomných v atmosféře, popisuje Beer-Lambertův zákon popisující propustnost jako funkci v závislosti na vzdálenosti, x , následovně:[16]

$$I_R/I_0 = \tau = \exp(-\gamma x) \quad (4.2)$$

Kde: I_R/I_0 je poměr mezi intenzitou na konci vzdálenosti x a intenzitou v počátečním bodě, γ je koeficient útlu. Útlumový koeficient je součet čtyř individuálních parametrů:

$$\gamma = \alpha_m + \alpha_a + \beta_m + \beta_a \quad (4.3)$$

Kde: α_m je molekulární rozptyl, α_a je rozptyl na aerosolech, β_m je molekulární absorpce a β_a je absorpce na aerosolech.

Rovnice pro útlumový koeficient ukazuje, že celkový útlum vyplývá ze superpozice různých rozptylů a absorpcí. Tomuhle tématu bude věnována samostatná kapitola.

4.4 Meteorologická viditelnost

Viditelnost byla definována původně pro meteorologické potřeby lidským pozorovatelem. Je definována tzv. Kruse modelem. Meteorologická vzdálenost je definována jako vzdálenost, kdy při vlnové délce 550 nm dosahuje propustnost atmosféry 2% své původní hodnoty.[4]

Od meteorologické viditelnosti se odvíjí útlum, kdy při jasné obloze (velké meteorologické viditelnosti) je útlum velmi malý, kdežto v případě husté mlhy (malá meteorologická viditelnost) je

útlum velký. Tomuto jevu bude věnována samostatná kapitola, ve které budou shrnuty vlivy mlhy a tím odvíjeného útlumu v závislosti na viditelnosti.

Vztah mezi meteorologickou viditelností V_M a koeficientem extinkce α_e je následující: [17]

$$\alpha_e \approx \frac{3,91}{V_M \left(\frac{555}{\lambda}\right)^q}; [km^{-1}; km, nm] \quad (4.4)$$

Kde: $q=0,585 \cdot V_M^{\frac{1}{3}}$; pro $V_M \leq 6$ km

Zeslabení optické intenzity v AOS na vzdálenost L_{12} je možno stanovit také podle koeficientu útlumu α_1 [dB/km] definovaný vztahem: [17]

$$\alpha_1 = \frac{-1}{L_{12}} 10 \log \frac{I_2}{I_1} \quad (4.5)$$

Vztah mezi koeficientem extinkce α_e [km^{-1}] a koeficientem útlumu α_1 [dB/km] je následující:

$$\alpha_e = 0,23\alpha_1 \quad (4.6)$$

V následující tabulce je ukázka hodnot koeficientu útlumu v závislosti na meteorologické viditelnosti.

Tabulka 4.2: *Přehled číselných hodnot útlumového koeficientu [17]*

V_M [km]	α_1 [dB/km]	Stav atmosféry
<0,05	>340	silná mlha
0,2 až 0,5	85 až 34	střední mlha
1,0 až 2,0	14 až 7,0	slabá mlha nebo silný déšť
2,0 až 4,0	7,0 až 3,0	opar
10 až 23	1,0 až 0,5	čistá

4.5 Rozptyl

Rozptyl je definován jako rozptýlení částic svazku nebo záření do různých směrů jako výsledek fyzické interakce částice s elektromagnetickou vlnou. Rozptýlené světlo je polarizované a má stejnou vlnovou délku jako je vlnová délka dopadající vlny na částici. To znamená, že rozptyl je lineární (nemění se vlnová délka). Nedochází ani k poklesu energie, jako je tomu u absorpce, ale protože je část energie odchýlena z původního směru, nedopadne tak na fotodetektor určitá část energie. Proto dochází ke snížení intenzity optického výkonu na fotodetektoru. [18][16]

Rozptyl je spektrálně závislý. Rozptýlená energie závisí na vlastnostech částice. Závisí na její velikosti ve srovnání s vlnovou délkou interagující optické vlny, indexu lomu a izotropní vlastnosti molekul. Jestliže jsou známy tyto parametry částic, lze druh rozptylu předvídat. Například velikost částic definuje typ souměrnosti rozptýlené energie s ohledem na směr šíření. Jestliže je velikost částice rovna vlnové délce optického záření, rozptyl na částici vyvolá dlouhý přední lalok, malé laloky na straně a malý lalok ve zpětném směru. Jsou známy tři druhy rozptylu, které budou stručně popsány.[18]

Protože rozptyl závisí na velikosti částice Υ , jedna z cest jak jej popsat je následující:[4]

$$x_0 = \frac{2\pi\Upsilon}{\lambda} \quad (4.7)$$

Kde: x_0 je parametr velikosti, Υ je rozměr částice a λ je vlnová délka optického svazku

Na základě parametru velikosti x_0 ($x_0 \ll 1$, $x_0 \approx 1$, $x_0 \gg 1$) je možno predikovat typ rozptylu (obrázek 4.3).

Tabulka 4.3: Typ rozptylu v závislosti na parametru velikosti x_0 [4]

Typ	Velikost (μm)	Parametr velikosti x_0	Rozptyl
Molekuly vzduchu	0,0001	0,00074	Rayleighův
Opar	0,01 – 1,0	0,074 – 7,4	Rayleighův/Mieův
Mlha	1 – 20	7,4 – 147,8	Mieův/Neselektivní
Děšť	100 – 1000	740 – 7400	Neselektivní
Sníh	1000 – 5000	7400 – 37000	Neselektivní

Celkový rozptyl je daný součtem jednotlivých typů rozptylu:

$$\beta_{\text{scat}} = \beta_{\text{rayleigh}} + \beta_{\text{mie}} + \beta_{\text{non-select}} \text{ [km}^{-1}\text{]} \quad (4.8)$$

Celkový atmosférický útlum způsobený rozptylem může být vypočítán modifikací Beerova zákona:

$$\tau = e^{-\beta_{\text{scat}} L} = 4,3429 \beta_{\text{scat}} L \text{ [dB]} \quad (4.9)$$

4.5.1 Rayleighův rozptyl

Pokud je parametr velikosti $x_0 \ll 1$, nastává tento rozptyl. Vlnová délka optického svazku je tak mnohem větší než velikost částice, např. molekuly vzduchu. Rozptyl je nepřímo úměrný čtvrté mocnině vlnové délky. To znamená, že kratší vlnové délky jsou rozptýleny mnohem více než delší vlnové délky. Protože AOS systémy pracují s delšími vlnovými délkami v oblasti IR, je možné Rayleighův rozptyl na přenosový signál zanedbat. Vzorec pro rozptyl je následující: [4][16]

$$\sigma_s = \frac{f e^4 \lambda_0^4}{6 \pi \epsilon_0^2 m^2 c^4} \frac{1}{\lambda^4} \quad (4.10)$$

Kde: f je síla oscilace, e je náboj elektronu, λ_0 je vlnová délka odpovídající přírodní frekvenci, ϵ_0 je dielektrická konstanta, c je rychlost světla, m je hmotnost oscilační entity

4.5.2 Mieův rozptyl

Nastává u částic, které mají srovnatelné rozměry s vlnovou délkou. Jedná se o částice jako je mlha, opar a aerosoly. Tyto částice jsou srovnatelné s používanými IR vlnovými délkami v AOS systémech, a proto je tento rozptyl dominantní. Teorie Mieova rozptylu je poměrně složitá. Empirický zjednodušený model je dán takto: [16]

$$\gamma = \frac{3,91}{V} \left(\frac{\lambda}{550} \right)^{-\delta} \quad (4.11)$$

Kde: V – meteorologická viditelnost

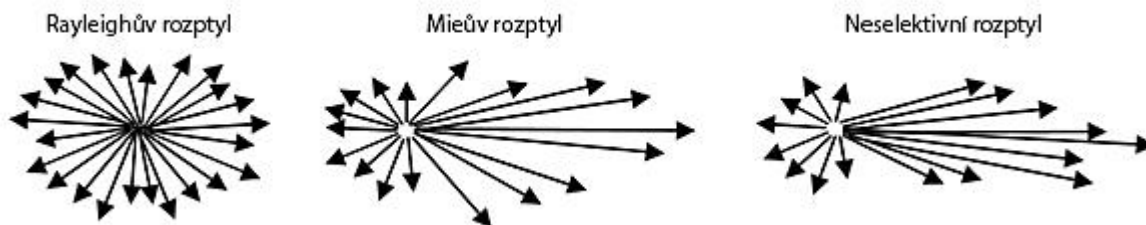
$$\delta = 0,585(V)^{1/3} \text{ pro } V < 6 \text{ km}$$

$$\delta = 1,3 \text{ pro } 6 \text{ km} < V < 50 \text{ km}$$

$$\delta = 1,6 \text{ pro } V > 50 \text{ km}$$

4.5.3 Neselektivní rozptyl

Nastává na částicích mnohem větší než je vlnová délka (parametr velikosti $x_0 \gg 1$). Mezi ně můžeme zařadit velké částice mlhy, déšť, sníh či kroupy.



Obrázek 4.3: Zleva: Rayleighův rozptyl, Mieův rozptyl a Neselektivní rozptyl

4.6 Absorpce

Absorpce je zapříčiněna interakcí fotonů s různými částicemi v atmosféře, jako je vodní pára či pevné částice ve formě prachu, popela a dalších částic. Část energie fotonu je pohlcena a přeměněna ve formě tepla. Mezi aerosoly jež mají největší absorpční potenciál na IR vlnových délkách patří voda, kyslík, dusík a oxid uhličitý. Absorpce je závislá na vlnové délce. To znamená, že pro každou vlnovou délku bude propustnost atmosféry jiná, a proto je třeba v AOS systémech používat vlnové délky nacházející se v tzv. přenosových oknech.[16][4]

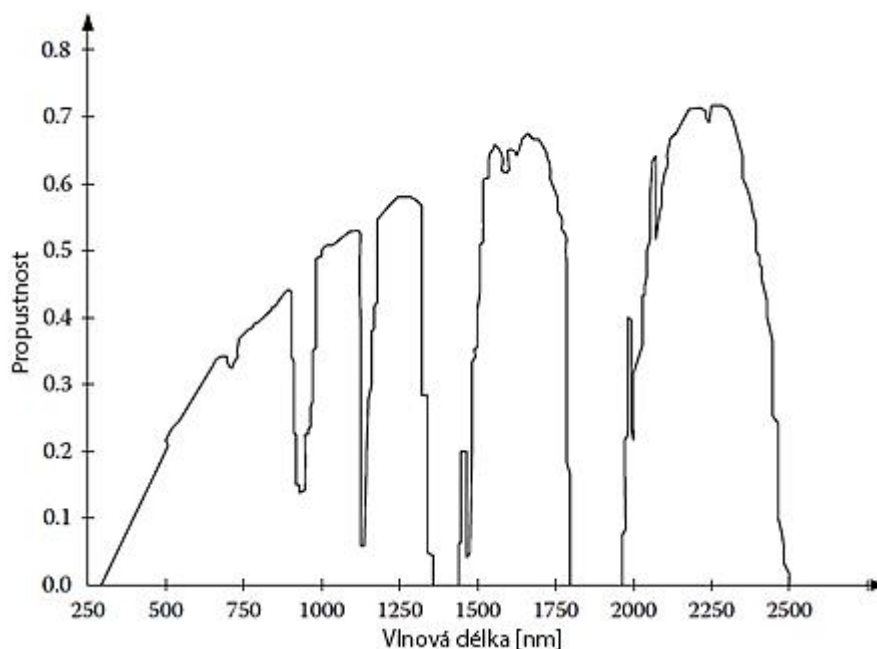
Atomy a molekuly jsou charakterizovány jejich indexem lomu. S imaginární částí indexu lomu, k , je spojen koeficient absorpce α následující relací:[16]

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda} = \sigma_a N_a \quad (4.12)$$

Kde: σ_a – průměr absorpčních částic, N_a – koncentrace absorpčních částic

4.6.1 Atmosférická okna

Jak již bylo zmíněno, v atmosféře se objevují částice, jako je voda, kyslík či oxid uhličitý, na kterých dochází k absorpci energie a tím k jejímu poklesu. Protože se jedná o děj závislý na vlnové délce, je třeba používat vlnové délky, které mají v atmosféře co největší propustnost (absorpce je malá). Následující obrázek zachycuje propustná okna vlnových délek mezi 250 až 2500 nm. Lze pozorovat pět absorpčních oken, ve kterých je poměrně vysoká propustnost. A to ve viditelném spektru a dále v určitých oblastech IR spektra. To je důvod proč se v AOS využívá provozních vlnových délek mezi 780 až 900 nm, 1200 až 1300 nm a dále kolem hodnoty 1500 nm. Je však nutné zmínit fakt, že přenosové charakteristiky atmosféry se mohou měnit v závislosti na geografické poloze. Například městské oblasti představují sníženou viditelnost oproti venkovským či přímořským oblastem. Tato změna vyplývá z existence různých typů aerosolů v atmosféře. [18]



Obrázek 4.4: Atmosférická okna propustnosti viditelného spektra a části IR spektra [18]

4.7 Vliv počasí na útlum optického svazku

4.7.1 Vliv deště

Rozptyl vlivem deště se nazývá neselektivní rozptyl (viz kapitola 4.5). Je to dáno rozměrem dešťové kapky (100 – 1000 μm), která je mnohonásobně větší než vlnová délka optického svazku u typických AOS systémů. Laser je schopný projít skrze vodní kapku s menším rozptylem oproti částicím tvořící mlhu, které jsou velmi malé a zůstávají déle v atmosféře. Naproti tomu dešťové kapky jsou větší a zůstávají v atmosféře kratší dobu. To je hlavní důvod, proč útlum vlivem deště je menší než v případě mlhy. Naproti tomu vlnové délky RF (např. mikrovlnné spoje) jsou náchylnější na dešť, protože velikost kapky je srovnatelnější s vlnovou délkou oproti vlnovým délkám AOS technologií. Na kapkách deště nastává neselektivní rozptyl, jenž může být vyjádřen relací:[4]

$$\beta_{\text{dešť}} = \pi a^2 N_a Q_{\text{rozptyl}} \left(\frac{a}{\lambda} \right) \quad (4.13)$$

Kde: a – poloměr dešťové kapky (cm), Q_{rozptyl} – koeficient rozptylu ($=2$), N_a = distribuce dešťových kapek (cm^{-3}), λ – vlnová délka laserového zdroje. Distribuce dešťových kapek může být vypočtena následujícím vztahem:

$$N_a = \frac{R}{1,33 \pi a^3 V_a} \quad (4.14)$$

Kde: R – intenzita srážek (cm/s), V_a – rychlost srážek dána vztahem:

$$V_a = \frac{2a^2 \rho g}{9\eta} \quad (4.15)$$

Kde: ρ – hustota vody ($\rho = 1 \text{ g/cm}^3$), g – gravitační konstanta ($g = 980 \text{ cm/s}^2$), η – viskozita vzduchu ($\eta = 1,8 \times 10^{-4} \text{ gm/cm}^2\text{s}$)

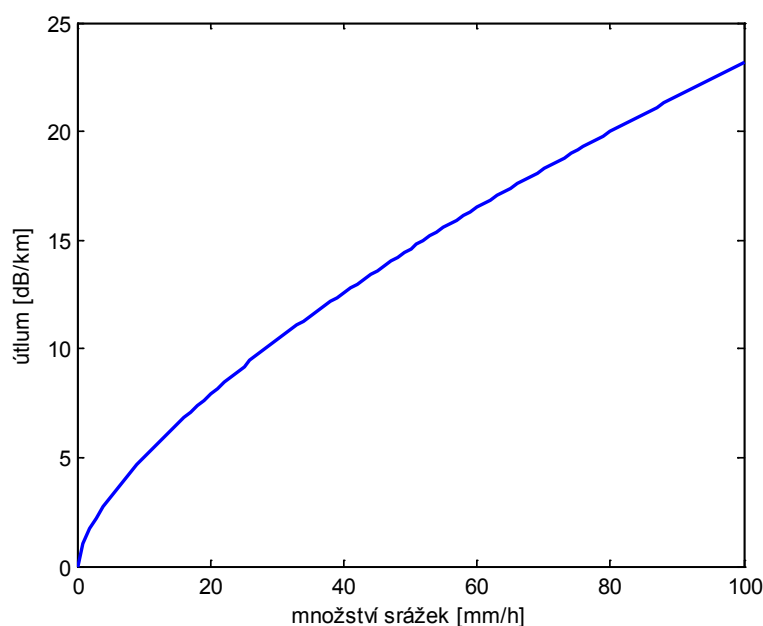
Výsledný útlum deště vlivem vyjádřený pomocí rozptylu lze vypočítat následujícím vztahem:[4]

$$\tau = \exp(-\beta_{\text{dešť}}L) \quad (4.16)$$

Podle [19] lze útlum vlivem deště modelovat pomocí následující rovnice (závislost je zobrazena v grafu na obrázku 1.5) zvanou jako Carbonneanova relace:

$$a_{\text{dešť}} = kR^\alpha = 1,076R^{2/3} \text{ [dB/km]} \quad (4.17)$$

Kde: R – množství srážek [mm/h]



Obrázek 4.5: Graf útlumu vlivem deště v závislosti na množství srážek dle Carbonneovy relace

Výše uvedená relace (4.17) má stejné koeficienty pro všechny hodnoty úhrnu srážek. V článku [20] udávají podobný model, avšak jeho koeficienty závisí také na intenzitě srážek a s použitím této relace oproti (4.17) dosahují menší chyby odhadovaného útlumu k naměřené hodnotě útlumu. Tyto koeficienty jsou dány následovně:

Tabulka 4.4: Koeficienty do relace (4.17) dle úhrnu srážek

Úhrn srážek [mm/h]	k	α
120 až 160	11,296	0,1683
103 až 120	0,2961	0,9300
70 až 103	0,2791	0,9471
12 až 70	0,4195	0,8486

4.7.2 Vliv sněhu

Sněhové vločky jsou ledové krystaly, které přicházejí v různých tvarech a velikostech. Obecně má však sníh tendenci být větší než dešť. Proto jsou podmínky podobné jako u deště a rozptyl vlivem

sněžení tak u AOS systémů nebývá moc velký problém. Dopad lehkého sněhu útlumově spadá přibližně mezi déšť na mírné mlze.[16]

Dle [19] bývá útlum vlivem sněžení modelován na základě mokrého nebo suchého sněhu touto rovnicí:

$$a_{snih} = aS^b [\text{dB/km}] \quad (4.18)$$

Kde: S – množství sněhových srážek [mm/h], λ – vlnová délka optického svazku

$$a = 5,42 \times 10^{-5} \lambda + 5,4958776 \quad b = 1,38 \quad \text{pro mokrý snih}$$

$$a = 1,023 \times 10^{-4} \lambda + 3,7855466 \quad b = 0,72 \quad \text{pro suchý snih}$$

4.7.3 Vliv mlhy

Mlha je nejvíce negativním jevem pro AOS spoje, protože se skládá z malých z malých kapiček vody s velikostí blízké vlnovým délkám IR v AOS. Podle velikostí částic, ze kterých je mlha složena rozdělujeme různé stupně mlhy. O mlze se mluví tehdy, je-li meteorologická viditelnost mezi 0 až 2 km. Pokud je viditelnost více než 2 km je tento stav označován jako „opar“. Je známo, že ve viditelné a blízké infračervené části spektra má mlha za následek snížení optického výkonu AOS spoje a v některých případech může komunikaci přerušit úplně. V následující tabulce jsou hodnoty viditelnosti a útlumu dle typu mlhy.[18][16]

Tabulka 4.5: Útlum vlivem mlhy v závislosti na viditelnosti a množství srážek

Podmínky	Srážky	Množství srážek [mm/h]	Viditelnost	Útlum [dB/km]
Hustá mlha			50 m	271,6
Silná mlha			200 m	59,6
Střední mlha	snih		500 m	20,9
Lehká mlha	snih průtrž	100	1 km	12,7
Jemná mlha	snih hustý déšť	25	2 km	4,22
Opar	snih střední déšť	12,5	4 km	2,5
Lehký opar	snih slabý déšť	2,5	10 km	0,9
Jasno	snih mrholení	0,25	20 km	0,3
Velmi jasno			50 km	0,2

Modelování útlumu vlivem mlhy je poměrně složitou záležitostí, protože distribuce a hustota částic mlhy se může měnit s nadmořskou výškou, což dělá modelování ještě složitější. Tři hlavní parametry používaných pro výpočet útlumu vlivem mlhy a oparu jsou viditelnost, relativní vlhkost a teplota. Nejdůležitějším parametrem je však meteorologická viditelnost. [18]

Existuje však několik modelů, které umožňují výpočet konkrétního útlumu pro různé vlnové délky založené na meteorologické viditelnosti. Dva nejrozšířenější modely jsou Krusův a Kimův model. Útlum se dá vypočítat touto rovnicí a podle použitého modelu se použije příslušný koeficient q : [19][21]

$$a_{mlha} = \frac{13}{V[km]} \left(\frac{\lambda}{\lambda_0} \right)^{-q} [\text{dB/km}] \quad (4.19)$$

Kde:

$$q \text{ pro Krusův model: } q = \begin{cases} 1,6, & V > 50 \text{ km} \\ 1,3, & 6 \text{ km} < V < 50 \text{ km} \\ 0,585V^{1/3}, & V < 6 \text{ km} \end{cases}$$

$$q \text{ pro Kimův model: } q = \begin{cases} 1,6, & V > 50 \text{ km} \\ 1,3, & 6 \text{ km} < V < 50 \text{ km} \\ 0,16V + 0,34, & 1 \text{ km} < V < 6 \text{ km} \\ V - 0,5, & 0,5 \text{ km} < V < 1 \text{ km} \\ 0, & V < 0,5 \text{ km} \end{cases}$$

V – meteorologická viditelnost, λ – vlnová délka zdroje záření, λ_0 – referenční vlnová délka

Mlhu lze dále rozdělit podle Al-Naboulsiho modelu, dle [46], na advektivní a konvektivní. Advektivní mlha vzniká proudem teplého a vlhkého vzduchu nad chladným povrchem. Vzduch se ochladí a dojde ke kondenzaci vodní páry. Útlum pro advektivní typ mlhy je dán následovným vztahem:

$$\gamma_{ADV}(\lambda) = \frac{0,11478\lambda + 3,8367}{V} \quad (4.20)$$

Kde: λ je vlnová délka a V je viditelnost

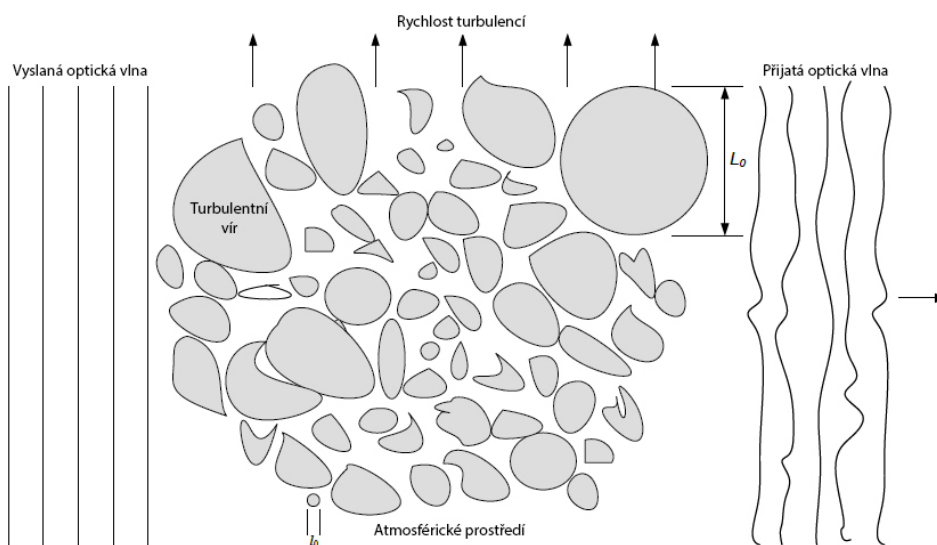
Konvektivní mlha vzniká ochlazováním teplého zemského povrchu studeným vzduchem při velmi pomalé rychlosti větru a vysoké vlhkosti. Kontakt vzduchu s teplým povrchem zapříčiní kondenzaci vodních par. Útlum tohoto typu mlhy je dán vztahem:

$$\gamma_{KON}(\lambda) = \frac{0,18126\lambda^2 + 0,13709\lambda + 3,8367}{V} \quad (4.21)$$

Kde: λ je vlnová délka a V je viditelnost

4.8 Turbulence v atmosféře

V předchozích kapitolách bylo popsáno jak atmosférické jevy, především mlha, má vliv na útlum optického svazku vlivem absorpce a rozptylu. Kromě těchto dějů má vliv na AOS spoje ještě další jev, a to turbulence. Hlavním zdrojem turbulencí jsou náhodné výkyvy indexu lomu v důsledku nehomogenity teploty a tlaku atmosféry podél přenosové cesty. Turbulence má za následek fluktuaci intenzity přijímaného optického signálu. Vznik turbulencí je zapříčiněn převážně zdrojem tepelného záření, jenž vyvolává náhodné časoprostorové změny indexu lomu, a pohybem atmosféry. V atmosféře můžeme vidět dva druhy pohybu, laminární a turbulentní pohyb. U turbulentního pohybu se trajektorie jednotlivých částic společně promíchávají a přecházejí tak mezi jednotlivými vrstvami a také samotné částice vykonávají svůj složitý pohyb. V případě turbulentního pohybu dochází k vytváření dílčích vírů, zvané jako turbulentní víry. U laminárního proudění toto nenastává. U tohoto proudění jsou dráhy částic rovnoběžné a nedochází k jejich promíchávání. [14][19][22]



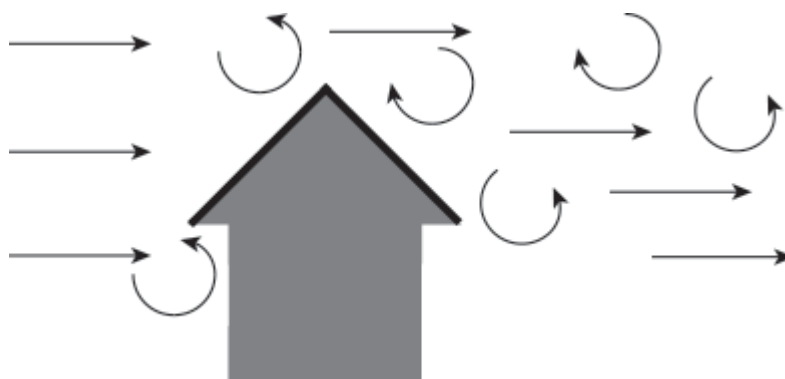
Obrázek 4.6: *Atmosférický kanál s turbulencemi [2]*

4.8.1 Termická turbulence

Vzniká nerovnoměrným zahříváním vzduchu. Vzhledem k tomu, že teplý vzduch má menší hustotu oproti vzduchu chladnému, vzniká neuspořádaný, náhodný vertikální pohyb vzduchové masy. Teplý vzduch stoupá vzhůru, zatímco ochlazený vzduch klesá k zemi. Vznikají tak masy vzduchu s odlišnými teplotami, které mají různý index lomu. Tyto masy dosahují velikostí od několika mm do km a jejich vznik je ovlivněn řadou faktorů. Například větrem (pokud bude silný, bude masa rozbitá na malé bubliny) a charakterem terénu (v členitějším terénu dochází k rychlejšímu a četnějšímu zahřívání vzduchové hmoty, které začnou stoupat).[23][24]

4.8.2 Mechanická turbulence

Vzniká třením proudícího vzduchu o nerovný zemský povrch, jako jsou lesy, kopce či budovy. Intenzita mechanické turbulence je závislá na směru a síle větru. Za zvláštní druh mechanické turbulence se považuje tzv. orografická turbulence, která vzniká v důsledku proudění vzduchu přes horské překážky. V závětrí horských hřebenů vznikají vertikální pohyby o rychlosti přibližně 10 m/s s extrémními hodnotami až 30 m/s.[25]



Obrázek 4.7: *Mechanická turbulence vytvořená překážkou [26]*

4.8.3 Strukturní index lomu

Tento parametr C_n^2 ($\text{m}^{-2/3}$) určuje sílu turbulence. Parametr však závisí na zeměpisné poloze, nadmořské výšce a denní době. V blízkosti zemského povrchu se nachází největší gradient teploty spojený s největší hodnotou atmosférického tlaku. Se vzrůstající nadmořskou výškou strukturní index lomu klesá. Největší proměnnými strukturního indexu lomu je vítr a nadmořská výška. Turbulence má tři hlavní účinky: scilintace, cestování paprsku (anglický termín beam wander) a rozšiřování paprsku. Jeden z nejpoužívanějších modelů pro popis strukturního indexu lomu je Hufnagel-Valleyův model:[4]

$$C_n^2 = 0,00594 \left(\frac{v}{27}\right)^2 (10^{-5}h)^{10} \exp\left(-\frac{h}{1000}\right) + 2,7 \times 10^{-16} \exp\left(-\frac{h}{1500}\right) + A_0 \exp\left(-\frac{h}{1000}\right)$$

Kde: h – nadmořská výška (m), v – rychlost větru (m/s), A_0 – síla turbulence na úrovni terénu ($1,7 \cdot 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$)

Tabulka 4.6: Míra turbulence dle hodnoty strukturního indexu lomu [24]

$C_n^2 [\text{m}^{-2/3}]$	Míra turbulence
10^{-16}	slabá
10^{-15}	střední
10^{-14}	silná
10^{-13}	velmi silná

4.8.4 Metoda určení útlumu vlivem turbulence

Fluktuace optické intenzity optického svazku v čase $I(t)$ je závislá na parametru strukturního indexu lomu. Relativní varianci optického signálu $\sigma_{I,rel}^2$ lze vyjádřit následovně:[22]

$$\sigma_{I,rel}^2 = \frac{\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2}{\langle I \rangle^2} = \frac{\langle I^2 \rangle}{\langle I \rangle^2} - 1 \quad (4.22)$$

Kde: I – optická intenzita signálu, $\langle \rangle$ – značí střední hodnotu

Jestliže platí, že $\sigma_{I,rel}^2 \ll 1$, pak může být využita Rytovova aproximace: [22]

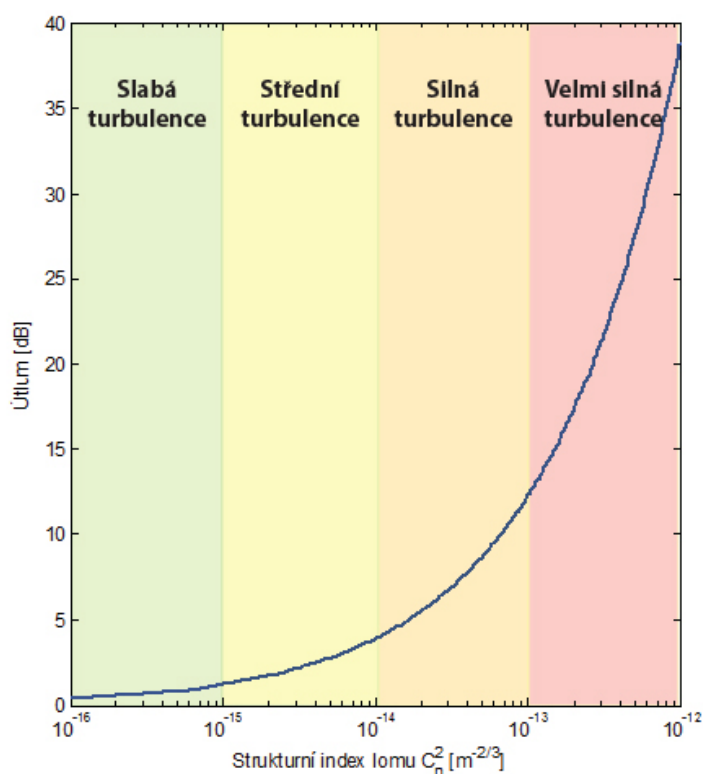
$$\sigma_{I,rel}^2 = K \times C_n^2 \times k^{\frac{7}{6}} \times L^{\frac{11}{6}} \quad (4.23)$$

Kde: K – konstanta pro rovinnou vlnu 1,23 a sférickou 0,5, k – vlnové číslo (m^{-1}), L – vzdálenost mezi vysílačem a přijímačem

Z této aproximace lze vyvodit vztah pro určení útlumu vlivem turbulence. Turbulence kromě fluktuace signálu vyvolává z principu i útlum, jenž se dá vypočítat následovně (průběh útlumu vlivem turbulence pro vlnovou délku 1550 nm je na obrázku 4.8): [22]

$$\alpha_{turb} = 2 \times \sqrt{23,17 \times C_n^2 \times k^{\frac{7}{6}} \times L^{\frac{11}{6}}} \quad (4.24)$$

Kde: konstanty 2 a 23,17 vychází z přepočtu log normálního rozdělení



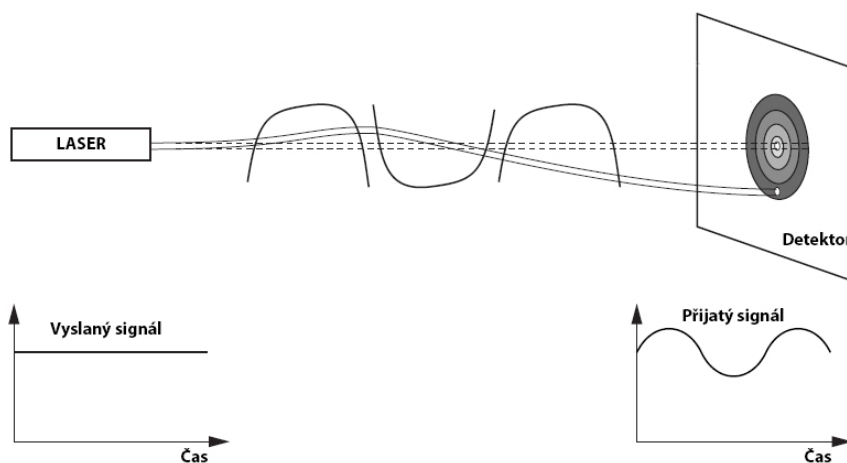
Obrázek 4.8: Útlum vlivem turbulence v závislosti na strukturním indexu lomu pro vlnovou délku 1550 nm

4.8.5 Vliv velikosti turbulentních vírů na optický svazek

Vliv je různý podle poměru velikosti turbulentní vírů a průměru optického svazku. Podle poměru mohou nastat dvě situace.

4.8.5.1 Velikost atmosférických vírů je větší než průměr optického svazku

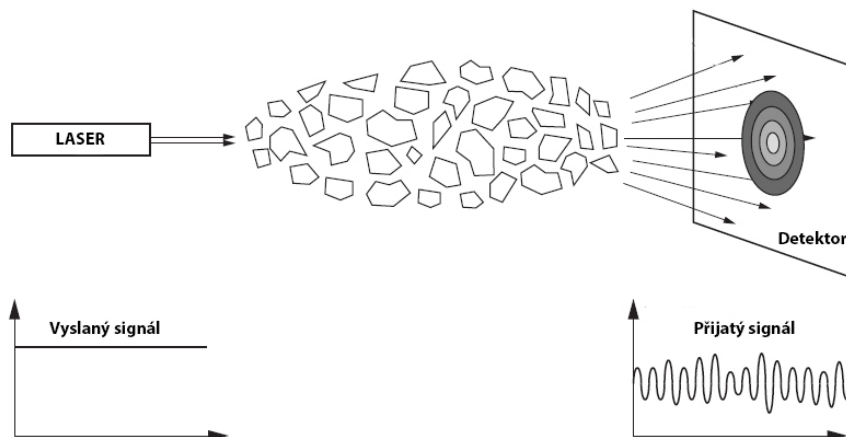
V tomto případě dochází k vychýlení svazku z jeho dráhy (dochází k ohybu svazku). Tento stav zachycuje následující obrázek.



Obrázek 4.9: Vychýlení optického svazku na turbulenci větší než průměr svazku [1]

4.8.5.2 *Velikost atmosférických vírů je menší než průměr optického svazku*

V tomto případě dochází k rozdělení svazku na jednotlivé paprsky a dochází ke kolísání intenzity optického signálu na straně přijímače. Tento děj se označuje jako scintilace (viz obrázek 4.10).



Obrázek 4.10: *Scintilace optického signálu vlivem turbulencí menších než průměr optického svazku[1]*

5 Linkové kódy a modulace

Modulace je důležitou částí přenosového řetězce na straně vysílače. Modulace je proces, kdy dochází k mapování informace (bitového toku dat z kodéru zdroje) do podoby vhodné k přenosu (ve AOS technologii na světlo o dané vlnové délce). Dle typu použité modulace může být optický svazek modulován změnami tří parametrů, a to změnou amplitudy, fáze nebo frekvence nosné vlny. Takto modulovaná vlna prochází médiem (atmosférou) a na přijímači dochází k reverznímu procesu zvaného demodulace. Jejím úkolem je detekce změn nosné vlny dle typu modulace a získání původního toku dat, jenž byl na vstupu modulátoru na straně vysílače.

V optických komunikacích se setkáváme s pojmy interní a externí modulace (nebo taky přímá a nepřímá). U interní modulace je optický zdroj řízen elektrickým signálem, který je již modulovaný. Tento postup se však nehodí pro vyšší přenosové rychlosti a proto je vhodné použití externí modulace, u které je světlený paprsek modulován externím modulátorem. Tím dochází k šetření zdroje světla, protože zdroj stále svítí oproti interní modulaci, kde dochází k neustálým změnám.[18]

Se zvyšujícími se požadavky na přenosové rychlosti je důležitým krokem výběr vhodného typu modulace. Každá modulace má různé požadavky na šířku pásma či se liší výkonovou účinností. Tyto parametry tak ovlivní celkový výkon daného systému. Je zde mnoho rozdílných typů modulací, které jsou vhodné pro optické atmosférické komunikace. Aktuálně nejvhodnější modulace dle [27] jsou intenzitní modulace, kde požadovaný průběh je modulován na okamžitý výkon nosné. Na přijímači je nejpraktičtější metoda přímé detekce, kdy fotodetektor vytváří proud úměrný detekovanému výkonu. Konkrétně používanou technikou je především modulace OOK, která je typická svou jednoduchostí. Mezi další můžeme zařadit pulzní modulace, které se dále dělí například na pulzní poziční či pulzně amplitudovou modulaci a další. Vzhledem k tomu, že průměrný vyzařovaný výkon je vždy limitovaný, výkon modulační techniky je často porovnáván z hlediska průměrného přijatého výkonu potřebného k dosažení požadované bitové chybovosti (BER) pro danou přenosovou rychlost. Je třeba, aby použitá modulační technika měla co nejlepší výkonovou účinnost, ale není to jediným rozhodujícím pravidlem. Důležitou roli zde také hraje složitost konstrukce vysílače a přijímače a požadavky na šířku pásma. [2][27]

V následujících podkapitolách budou stručně popsány nejtypičtější typy modulací využívané v optických komunikacích.

5.1 Linkové kódy

Linkový kód bývá často zaměňován s modulací, avšak modulace určuje, jak budou jednotlivé bity vyslány, zatímco linkový kód určuje jejich reprezentaci. Linkové kódy slouží k vyjádření jednotlivých bitů pro přenos dat. Mezi základní typy linkových kódů, jenž se uplatňují v optických komunikacích patří NRZ (Non Return to Zero), RZ (Return to Zero) a Diferenciální Manchester. Mezi vlastnosti, které se mohou u jednotlivých kódů vzájemně lišit je výkonová spektrální hustota, odolnost vůči rušení či pravidelnost přechodů mezi úrovněmi. Některé kódy tak mohou využívat více energie na jeden bit než ostatní kódy při stejném průměrném vyslaném výkonu. Tato charakteristika může zapříčinit větší imunitu vůči šumu či menší pravděpodobnost vzniku chyby.[29][30]

5.1.1 NRZ

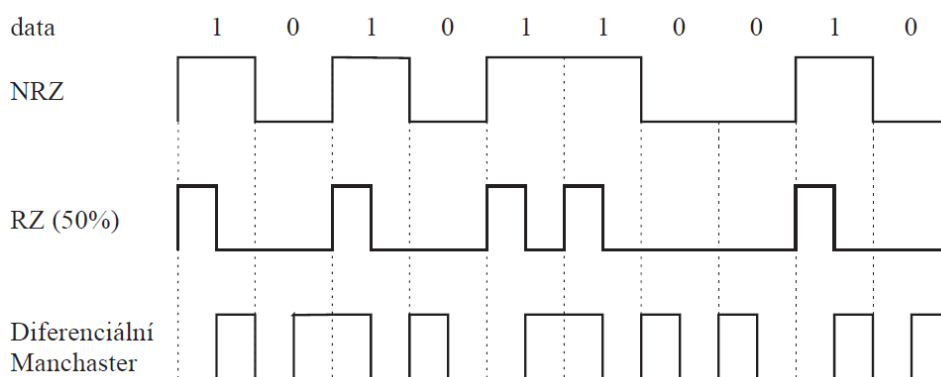
Jednoduchý kód, u kterého je bit s logickou úrovní $\log 1$ reprezentován pulzem po dobu trvání celé bitové periody T_b a amplitudou A . Bit s logickou úrovní $\log 0$ je reprezentován absencí pulzu po dobu trvání celé bitové periody. Velkým problémem u tohoto kódu je řada po sobě jdoucích stejných hodnot, která může způsobit ztrátu synchronizace mezi vysílačem a přijímačem.[29][30]

5.1.2 RZ

V tomto linkovém kódu je bit s logickou úrovní $\log 1$ reprezentován pulzem o amplitudě A , po dobu trvání menší než je bitová perioda T_b a $\log 0$ je, tak jako u NRZ, reprezentována absencí pulzu. Návrat k nule je namysli v tom, že pulz představující $\log 1$ se vrací do nuly ještě před koncem bitové periody. Dle doby trvání pulzu určujeme tzv. střidu (např. 50%).[29][30]

5.1.3 Diferenciální Manchester

Tento kód udržuje konstantní a vyvážený tok logických hodnot bez ohledu na vstupní signál i ve chvíli, kdy je datový tok tvořen dlouhou řadou jedniček či nul. Logická hodnota je vyjádřena přechodem mezi dvěma úrovněmi, což přináší určité výhody jako je lepší detekce oproti detekci na základě prahové úrovně. Bit s logickou úrovní $\log 0$ je dán přechodem mezi úrovněmi na začátku bitové periody a při $\log 1$ se úroveň na začátku bitové periody nemění. K přechodu úrovní dochází vždy uprostřed bitové periody. Na obrázku níže jsou zobrazeny výše uvedené linkové kódy, na kterých lze vidět jejich rozdíly. [29]



Obrázek 5.1: Druhy linkových kódů a jejich princip[29]

5.2 Modulační techniky

5.2.1 On-Off Keying (OOK)

OOK modulace je dominantní modulačním schématem používaným v technologii AOS. Je to dáno především jednoduchostí a odolností vůči nelinearitě laseru. Jedná se o intenzitní modulaci, která je speciálním typem modulace ASK, kde přenášený symbol je reprezentován úrovní amplitudy. OOK má jednu amplitudu nulovou (přítomnost optického signálu v podobě $\log 1$ a nepřítomnost v podobě $\log 0$). Protože se však objevují v přenosovém kanále šumy, je nutné použít rozhodovací úroveň pro dané logické úrovně. Ta se může adaptivně měnit v závislosti na stavu atmosféry (vliv turbulencí, mlhy a jiné viz kapitola 4). OOK může být použita v provedení NRZ nebo RZ. V případě NRZ je doba trvání pulzu rovna době trvání symbolu. U OOK-RZ je doba trvání pulzu menší. To má za následek

snížení energetické náročnosti, ale zvýšení šířky pásma. Bitová rychlost R_b je dána převrácenou hodnotou doby trvání bitu T_b . [2][18]

Pravděpodobnost chyby pro NRZ-OOK kódovaná data detekovaná fotodiodou může být vyjádřena funkcí poměru signálu od šumu (SNR) následovně: [28]

$$BER_{NRZ-OOK} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{\sqrt{SNR}}{2\sqrt{2}} \right) \quad (5.1)$$

Kde: erfc je funkce dána vztahem $\operatorname{erfc}(x) = (2\pi)^{-\frac{1}{2}} \int_x^\infty \exp(-t^2) dt \approx \frac{e^{-x^2}}{\sqrt{\pi}x}$

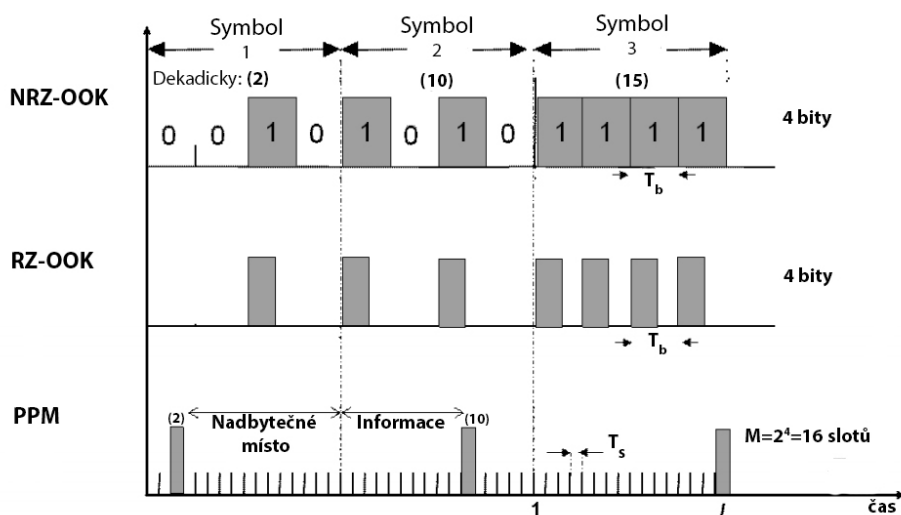
Pro RZ-OOK je požadovaná hodnota parametru SNR poloviční (-3 dB) pro dosažení stejné bitové chybovosti jako u modulace NRZ-OOK a je vyjádřena vztahem: [28]

$$BER_{RZ-OOK} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{\sqrt{SNR}}{2} \right) \quad (5.2)$$

5.2.2 Pulzní polohová modulace (M-PPM)

PPM je modulační technika pro zvýšení účinnosti přenosu v systémech AOS. PPM je ortogonální modulace, která byla studována především pro její lepší výkonovou účinnost v porovnání s ostatními modulacemi. Tato modulace dosahuje zlepšení výkonové účinnosti oproti OOK, ale za cenu zvýšení potřebné šířky pásma a větší složitosti. [27]

V této modulaci se symbol sestává z jediného pulzu v jednom slotu. Každý blok $\log_2 M$ bitů je mapován do jednoho z M možných slotů. Notace M-PPM určuje řád modulace. Každý symbol se skládá z pulzu o konstantním výkonu P v jednom slotu a se zbývajících prázdnými $M-1$ sloty. Pozice pulzu koresponduje s dekadickou hodnotou $\log_2 M$ datových bitů. Informace je tak kódovaná polohou pulzu v symbolu (viz obrázek 5.2). [2][27]



Obrázek 5.2: Časové průběhy modulací OOK (NRZ a RZ) a 16-PPM [2]

PPM přijímač však pro správné demodulování potřebuje slotovou a symbolovou synchronizaci. Protože je však tato modulace výkonově účinná, je atraktivní pro AOS systémy především v aplikacích ve vesmíru. [2]

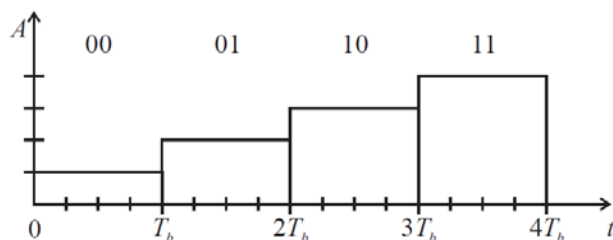
Pro M-PPM modulaci může být hodnota BER vyjádřena následující rovnicí: [28]

$$\text{BER}_{M\text{-PPM}} = \frac{1}{2} \text{erfc} \left(\frac{\sqrt{\frac{SNR}{2} \log_2 M}}{2\sqrt{2}} \right) \quad (5.3)$$

5.2.3 Pulzní amplitudová modulace (M-PAM)

Tento typ modulace je forma, kdy informace je kódována do série signálových pulzů s danou amplitudou. Velikost amplitudy představuje určitou binární informaci. Parametr M určuje řád modulace. Například u 4-PAM rozlišujeme 4 velikosti amplitudy (každá představuje jeden symbol). V každém symbolu se tak přenáší $\log_2 M$ bitů. Doba pulzu je rovna trvání jednoho symbolu. Hodnota BER je dána následovně: [28]

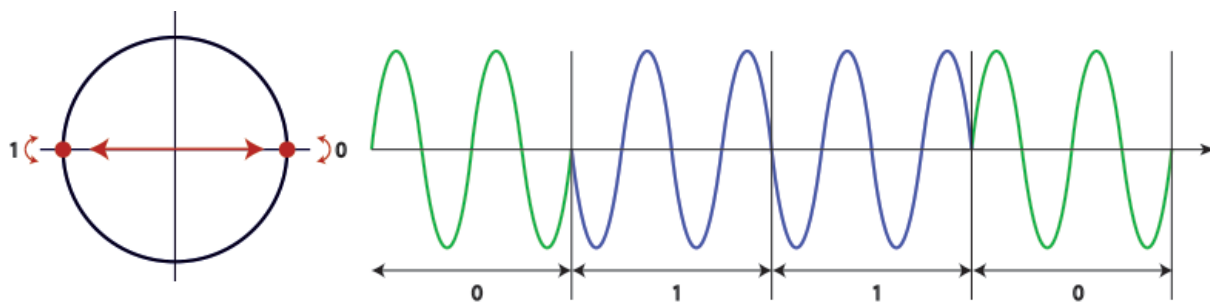
$$\text{BER}_{M\text{-PPM}} = \frac{1}{2} \text{erfc} \left(\frac{\sqrt{SNR \log_2 M}}{2\sqrt{2(M-1)}} \right) \quad (5.4)$$



Obrázek 5.3: Modulace typu 4-PAM[29]

5.2.4 Fázová modulace (M-PSK)

Fázové klíčování je technika, která mění fázi nosné vlny. V BPSK modulaci jsou dvě změny fáze, kde první změna představuje log 1 a druhá log 0. Při změně vstupního signálu z jedné úrovně na druhou je fáze výstupního signálu posunuta o hodnotu π . Tento stav ilustruje následující obrázek.[27]



Obrázek 5.4: Princip fázového klíčování BPSK a její konstelační diagram[31]

Demodulátor musí určit změnu fáze a tyto změny mapovat zpět na původní symboly. Toto je umožněno dvěma způsoby. Prvním způsobem je porovnávání přijatého signálu se signálem referenčním. Tento způsob je označován jako koherentní detektor. Druhý způsob je označován jako diferenciální klíčování fáze (DPSK), kdy demodulátor neporovnává přijímaný signál s referenčním, ale s předchozím průběhem přijatého signálu.

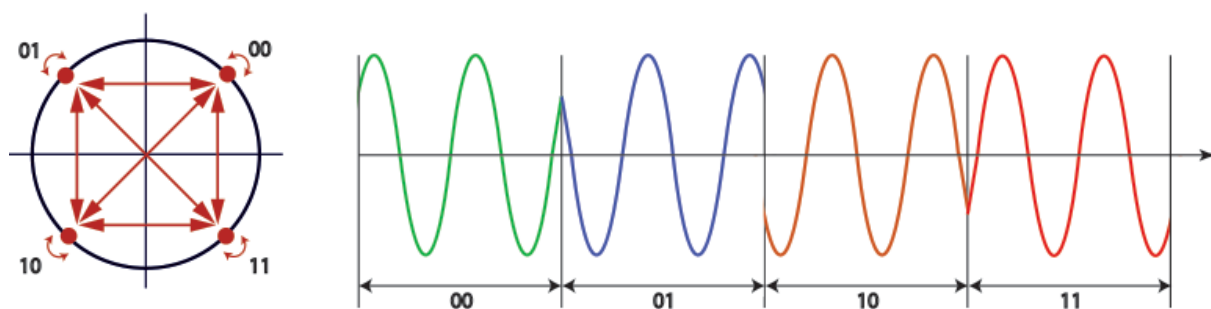
BPSK modulace má pouze dva stavy. To znamená, že jeden symbol se rovná jednomu bitu a proto je někdy tato modulace označována jako 2-PSK. Existují však i vícecestavové M-PSK modulace, které v jednom symbolu přenáší více bitů. Tyto vícecestavové modulace jsou však méně

robustní než modulace B-PSK. Pro modulaci B-PSK je vyjádření hodnoty BER v závislosti na poměru SNR následující:[28]

$$\text{BER}_{BPSK} = \frac{1}{2} \text{erfc}(\sqrt{\text{SNR}}) \quad (5.5)$$

Mezi hojně využívanými vícestavovými modulacemi s fázovým klíčováním je QPSK nebo také 8-PSK. Varianta QPSK používá čtyři stavy (viz obrázek 5.5), jenž každý z těchto stavů mapuje dva bity do jednoho symbolu. QPSK tak má v porovnání s BPSK dvojnásobnou bitovou rychlost při stejném požadavku na šířku pásma. Bitová chybovost je vyjádřena vztahem: [28]

$$\text{BER}_{QPSK} = \text{erfc}(\sqrt{\text{SNR}}) \quad (5.6)$$

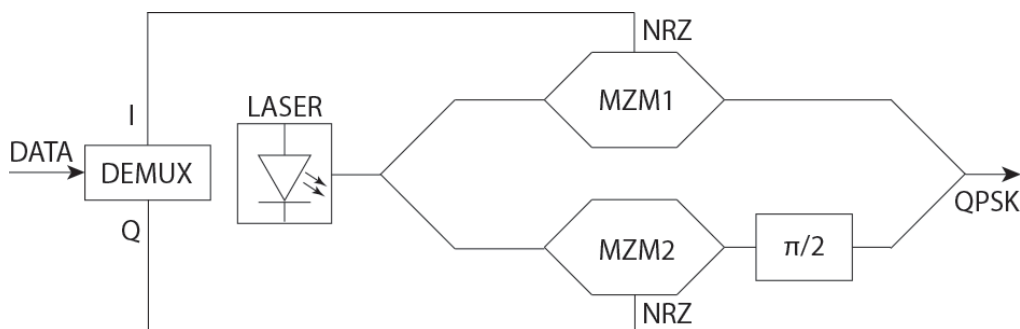


Obrázek 5.5: Princip fázového klíčování QPSK a její konstelační diagram[31]

Diferenciální fázové klíčování má výhodu v tom, že přijímač nepotřebuje referenční signál pro demodulaci, ale demoduluje informace na základě předchozího stavu přijatého signálu. Použitím diferenciálního klíčování na vysílaci bude bit s logickou úrovní 1 přenesen s fázovým posunem π vzhledem k předchozí fázi a bit s logickou 0 bude přenesen beze změny fáze. Hodnota BER pro DPSK je dána následovně: [28]

$$\text{BER}_{DPSK} = \frac{1}{2} \text{erfc}\left(\frac{\sqrt{\text{SNR}}}{\sqrt{2}}\right) \quad (5.7)$$

Na následujícím obrázku je schéma zapojení optického QPSK modulátoru, který využívá dvojici Mach-Zehnderových modulátorů, které jsou řízeny daty přicházející z demultiplexeru. Konstelační diagram této modulace je na obrázku 5.5.

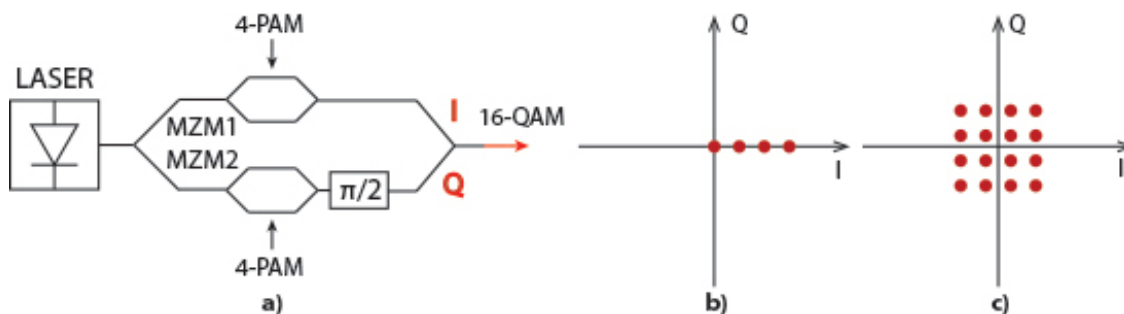


Obrázek 5.6: QPSK modulátor[39]

5.2.5 Kvadrurní amplitudová modulace (M-QAM)

Tato modulace kombinuje princip fázového a amplitudového klíčování, kdy každý symbol je složen z několika period nosné a je určen právě amplitudou a fází. Hojně je tato modulace především využívána v rádiové technice s velkými řády M. Této modulace můžeme docílit použitím dvěma

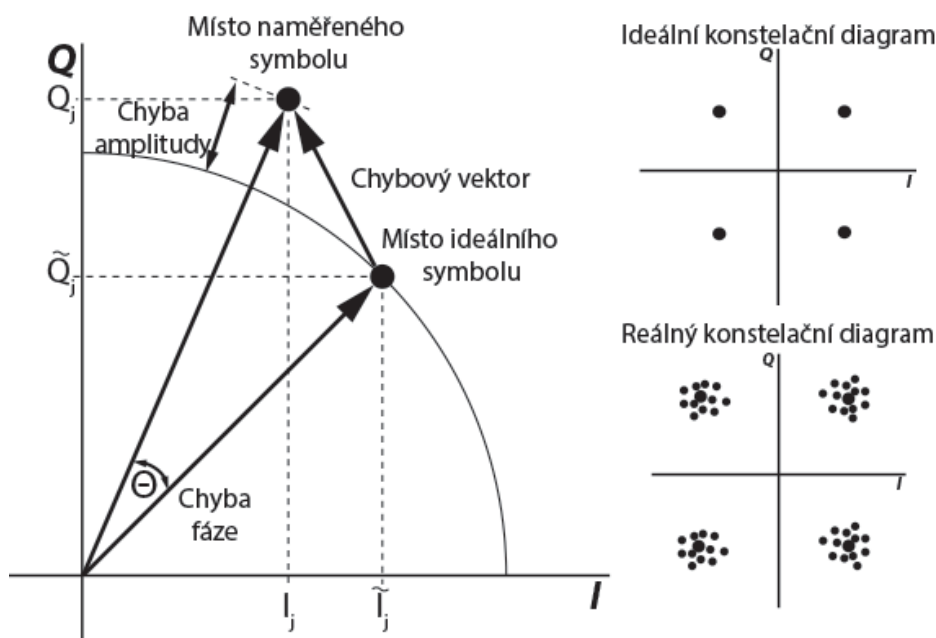
Mach-Zehnder modulátory, kdy jsou přicházející data modulována na dvě nosné, za pomoci modulace PAM, které jsou vzájemně posunuté o hodnotu $\pi/2$. Součtem těchto dvou složek (I a Q) je vytvořen signál modulovaný modulací QAM (viz obrázek 5.7a).[32]



Obrázek 5.7: a) Princip modulátoru QAM b) konstelační diagram 4-PAM c) konstelační diagram 16-QAM[32]

5.3 Kvalitativní parametry modulací

Tak jako sledujeme například parametr bitové chybovosti, tak u modulací máme parametry, díky kterým jsme schopni vyhodnotit, jak moc byla při přenosu modulovaná optická vlna ovlivněna negativními jevy přenosového prostředí. Mezi tyto parametry patří parametr modulační chybovosti MER (Modulation Error Ratio) a parametr amplitudy chybového vektoru EVM (Error Vector Magnitude). Oba parametry souvisí s konstelačním diagramem. V ideálním konstelačním diagramu se nachází pouze ideálně umístěné body, kdežto v reálných podmínkách díky různým působením šumu tohoto stavu nedocílíme a jednotlivé body v konstelačním diagramu se tak vychylují od ideálního místa a následně se jeví jako by byl daný bod rozprostřený (viz obrázek 5.8).



Obrázek 5.8: Grafická reprezentace chybového vektoru [40]

5.3.1 Parametr MER

Je definován (dle [41]) jako poměr součtu čtverců amplitud ideálních symbolových vektorů k součtu čtverců amplitud chybových symbolových vektorů. Tento parametr je obdobou SNR v digitálně modulovaném signálu a bývá také obvykle vyjádřen v decibelové míře. Lze vyjádřit pomocí obrázku 5.8 následovně: [40]

$$MER = \frac{\sum_{j=1}^N (\tilde{I}_j^2 + \tilde{Q}_j^2)}{\sum_{j=1}^N [(I_j - \tilde{I}_j)^2 + (Q_j - \tilde{Q}_j)^2]} \quad (5.8)$$

Kde: \tilde{I}_j je velikost komponenty ideálního symbolu na ose I konstelačního diagramu, I_j je velikost komponenty skutečného symbolu na ose I konstelačního diagramu, \tilde{Q}_j je velikost komponenty ideálního symbolu na ose Q konstelačního diagramu, Q_j je velikost komponenty skutečného symbolu na ose Q konstelačního diagramu

5.3.2 Parametr EVM

Udává vzdálenost mezi aktuálním měřeným vektorem symbolu a ideálním vektorem symbolu. EVM představuje střední kvadratickou hodnotu (RMS) chybových hodnot jednotlivých stavů. Výsledek může být tak jako MER vyjádřen v decibelech, ale spíše se využívá vyjádření v procentech následovně: [40] [41]

$$EVM_{RMS} = \sqrt{\frac{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N [(I_j - \tilde{I}_j)^2 + (Q_j - \tilde{Q}_j)^2]}{s_{max}^2}} \times 100 [\%] \quad (5.9)$$

Kde: s_{max} je amplituda vektoru v konstelaci, \tilde{I}_j je velikost komponenty ideálního symbolu na ose I konstelačního diagramu, I_j je velikost komponenty skutečného symbolu na ose I konstelačního diagramu, \tilde{Q}_j je velikost komponenty ideálního symbolu na ose Q konstelačního diagramu, Q_j je velikost komponenty skutečného symbolu na ose Q konstelačního diagramu

6 Polarizace světla a její popis

Polarizace světla je podle [33] určena časovým průběhem směru vektoru intenzity elektrického pole $\vec{E}(\vec{r}, t)$. Pro monochromatické světlo se tři složky vektoru intenzity elektrického pole sinusově mění s časem. Amplituda a fáze bývá obecně různá, takže v každém místě \mathbf{r} se koncový bod vektoru $\vec{E}(\vec{r}, t)$ pohybuje v rovině, v níž opisuje elipsu. Mluvíme pak o elipticky polarizované vlně. Orientace a excentricita elipsy určuje stav polarizace a její rozměry jsou určeny intenzitou světla. Pokud je elipsa degenerována na přímku, pak je vlna lineárně polarizovaná. Jestliže se elipsa stane kružnicí, pak hovoříme o kruhově polarizované vlně.

Stav polarizace má vliv na interakci světla s látkou, například:[33]

- Množství světla odraženého na rozhraní dvou látek závisí na polarizaci
- Množství absorbovaného světla určitými materiály závisí na polarizaci
- Rozptyl světla je citlivý na polarizaci
- Index lomu anizotropních materiálů. Různě polarizované světlo se šíří různými rychlostmi a vykazují různá fázová posunutí. Při šíření vlny se polarizační elipsa mění.

6.1 Polarizace

Uvažujme monochromatickou rovinnou vlnu o frekvenci ν , která se šíří ve směru osy z rychlostí c . Vektor elektrického pole leží v rovině $x - y$ (kolmý na osu šíření z) a je popsán následujícím vztahem: [33]

$$\vec{E}(z, t) = \text{Re} \left\{ \vec{A} \exp \left[j 2 \pi \nu \left(t - \frac{z}{c} \right) \right] \right\} \quad (6.1)$$

Kde: komplexní obálka \vec{A} je vektor s komplexními složkami A_x a A_y .

$$\vec{A} = A_x \hat{x} + A_y \hat{y} \quad (6.2)$$

K popsání polarizace takovéto vlny najdeme koncový bod vektoru intenzity elektrického pole v každém místě \mathbf{z} jako funkci času.

6.1.1 Eliptická polarizace

Vyjádřením A_x a A_y podle jejich velikostí a fází, $A_x = a_x \exp(j\varphi_x)$ a $A_y = a_y \exp(j\varphi_y)$ a dosazením do rovnic (6.1) a (6.2) dostaneme: [33]

$$\vec{E}(z, t) = E_x \hat{x} + E_y \hat{y} \quad (6.3)$$

Kde:

$$E_x = a_x \cos \left[2 \pi \nu \left(t - \frac{z}{c} \right) + \varphi_x \right] \quad (6.4a)$$

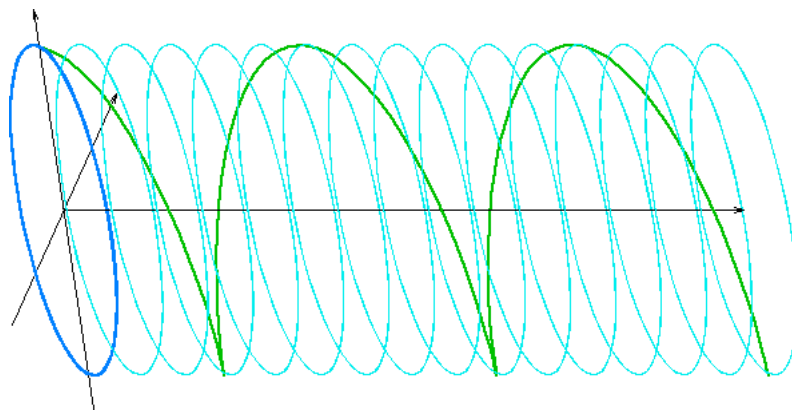
$$E_y = a_y \cos \left[2 \pi \nu \left(t - \frac{z}{c} \right) + \varphi_y \right] \quad (6.4b)$$

jsou složky, x a y , vektoru elektrického pole, které jsou periodické funkce oscilující s frekvencí ν . Rovnice (6.4) jsou parametrické rovnice elipsy:

$$\frac{E_x^2}{a_x^2} + \frac{E_y^2}{a_y^2} - 2 \cos \varphi \frac{E_x E_y}{a_x a_y} = \sin^2 \varphi \quad (6.5)$$

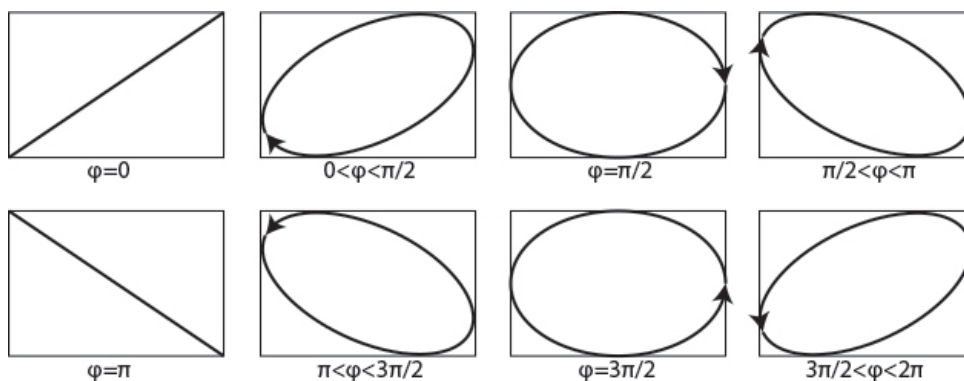
Kde: $\varphi = \varphi_y - \varphi_x$ je fázový rozdíl.

Pro určitou hodnotu z koncový bod rotuje v rovině $x - y$ a opisuje elipsu. Vektor intenzity elektrického pole se tak v určitých časových okamžicích nachází na šroubovici, která tvoří válcovou plochu eliptického průřezu (viz obrázek 6.1). Protože se jedná o periodickou funkci, děj se po opsání elipsy periodicky opakuje. [33]



Obrázek 6.1: *Eliptická polarizace vlny*[36]

Tvar elipsy určuje stav polarizační vlny. Její tvar závisí na poměru amplitud a_y/a_x a fázovému rozdílu $\varphi = \varphi_y - \varphi_x$. Obrázek 6.2: zobrazuje, jak se mění tvar elipsy v závislosti na fázovém rozdílu. Podle směru rotace vektoru intenzity elektrického pole určíme, jestli se jedná o pravotočivou polarizaci ($\sin \varphi > 0$) nebo levotočivou polarizaci ($\sin \varphi < 0$). [33][34]



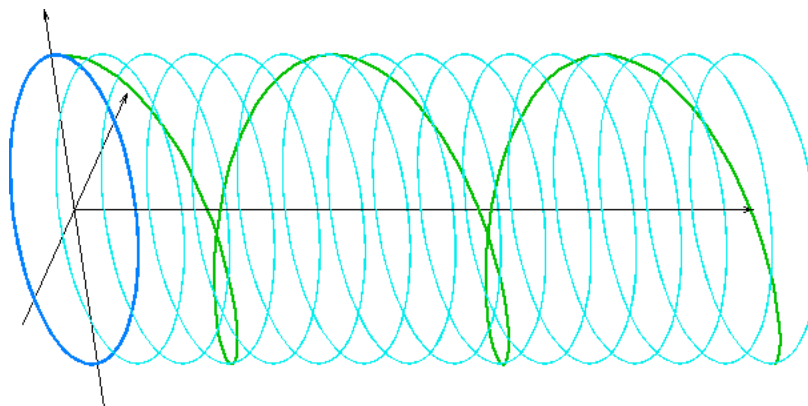
Obrázek 6.2: *Tvar elipsy v závislosti na fázovém rozdílu*[34]

Mohou nastat dva speciální případy eliptické polarizace. A to pokud je elipsa degenerována na přímku nebo kružnici. Potom mluvíme o lineární nebo kruhové polarizaci. [34]

6.1.2 Kruhová polarizace

Elipsa přejde v kružnici, jestliže je fázový rozdíl $\varphi = \pm\pi/2$ a amplitudy $a_x = a_y = a_0$. Pak ze vztahu (6.4) vyplývá $E_x = a_0 \cos \left[2\pi\nu \left(t - \frac{z}{c} \right) + \varphi_x \right]$ a $E_y = \pm a_0 \cos \left[2\pi\nu \left(t - \frac{z}{c} \right) + \varphi_x \right]$, z toho plyne $E_x^2 + E_y^2 = a_0^2$, což je rovnice kružnice. Válcová plocha eliptického průřezu (obrázek 6.1) se změní na plochu s kruhovým průřezem (obrázek 6.3). Pokud je fázový rozdíl $+\pi/2$, pak hovoříme

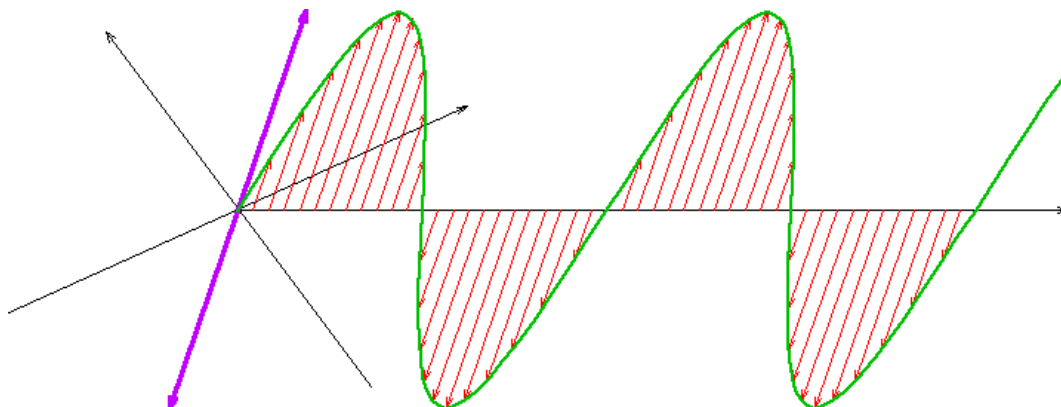
o pravotočivé kruhové polarizaci. V opačném případě, kdy je fázový rozdíl roven $-\pi/2$, hovoříme o levotočivé kruhové polarizaci. [33]



Obrázek 6.3: Kruhová polarizace vlny[36]

6.1.3 Lineární polarizace

Elipsa přejde v přímku, jestliže jedna ze složek elektrické intenzity bude rovná nule (např. $a_x=0$), pak je světlo polarizované ve směru druhé složky (osy y), nebo je-li fázový rozdíl $\varphi = 0$ nebo π . Válcová plocha eliptického průřezu se změní na rovinu (viz obrázek 6.4). Někdy je také tato polarizace nazývána jako vlna polarizovaná v rovině. Například pokud jsou amplitudy elektrické intenzity rovny, pak je rovina polarizace totožná s rovinou $y - z$. [33]



Obrázek 6.4: Lineárně polarizovaná vlna[36]

6.2 Stokesovy parametry

Tuto reprezentaci polarizace zavedl G.G. Stokes, který zjistil, že každý stav polarizovaného světla může být popsán čtyřmi měřitelnými veličinami, nyní známé jako Stokesovy parametry. První parametr určuje celkovou intenzitu optického pole a další tři parametry popisují polarizační stav. G.G. Stokes také ukázal, že jeho parametry nemusí být aplikovány jen na nepolarizované světlo, ale lze jimi také popsat částečně či úplně polarizované světlo.

Odvození Stokesových parametrů vychází dle [35] (zde najdeme podrobné odvození) z rovnice (6.5). Pro monochromatickou vlnu platí, že amplitudy a fáze jsou konstantní po celou dobu a dokud jsou konstantní, pak složky vektoru E_x a E_y budou nadále závislostí času (viz rovnice (6.4)).

Proto se členy vektoru v rovnici (6.5) berou jako střední hodnota a po následných matematických úpravách dostaneme Stokesovy parametry pro rovinnou vlnu:

$$S_0 = a_x^2 + a_y^2 \quad (6.6a)$$

$$S_1 = a_x^2 - a_y^2 \quad (6.6b)$$

$$S_2 = 2a_x a_y \cos \varphi \quad (6.6c)$$

$$S_3 = 2a_x a_y \sin \varphi \quad (6.6d)$$

Dále mezi parametry platí vztah: [35]

$$S_0^2 = S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 \quad (6.7)$$

Stokesovy parametry jsou reálná čísla. První parametr S_0 je celková intenzita světla, S_1 popisuje, jak moc je vlna lineárně horizontálně nebo vertikálně polarizovaná, S_2 množství lineární $+45^\circ$ nebo -45° polarizace a S_3 popisuje pravotočivou nebo levotočivou kruhovou polarizaci v paprsku.

Jestliže máme částečně polarizované světlo, pak vztahy (6.6) platí pro velmi krátké časové okamžiky, protože amplituda a fáze kolísá. Použitím Schwarzovi nerovnosti je možné pro každý stav polarizovaného světla použít nerovnici (6.8). Rovnost platí v případě úplné polarizace a nerovnost v případě částečné polarizace nebo u nepolarizovaného světla. [35]

$$S_0^2 \geq S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 \quad (6.8)$$

Stokesovy parametry dovolují popsat také stupeň polarizace P (nebo také označení DOP) pro každý stav polarizace následující definicí: [35]

$$DOP = \frac{I_{pol}}{I_{tot}} = \frac{(S_1^2 + S_2^2 + S_3^2)^{\frac{1}{2}}}{S_0}; 0 \leq DOP \leq 1 \quad (6.9)$$

Kde: I_{pol} je intenzita polarizované části světla a I_{tot} je celková intenzita paprsku. Hodnota $DOP = 1$ znamená úplně polarizované světlo, $DOP = 0$ je nepolarizované světlo a interval mezi $<0;1>$ je částečně polarizované světlo.

6.2.1 Ukázka zápisu polarizace pomocí Stokesových parametrů

6.2.1.1 Linární horizontální polarizace

Pro tento případ je vertikální část $a_y=0$, a tak je tento typ polarizace určen parametry:

$$S_0 = a_x^2; S_1 = a_x^2; S_2 = 0; S_3 = 0$$

6.2.1.2 Kruhová pravotočivá polarizace

Podmínky pro získání tohoto typu polarizace jsou $a_x=a_y=a_0$ a $\varphi=90^\circ$. Proto Stokesovy parametry jsou následující:

$$S_0 = 2a_0^2; S_1 = 0; S_2 = 0; S_3 = 2a_0^2$$

6.3 Muellerova matice

V předchozí kapitole byl uveden popis polarizovaného světla pomocí Stokesových parametrů. Nyní bude popsán mechanismus, jak se provádí popis interakce polarizovaného světla s prvky, které mohou zapříčinit změnu stavu polarizace.

Optický svazek dopadající na polarizační prvek je definován svými Stokesovými parametry S_i a výsledný svazek je charakterizován novými parametry S'_i . Pro popis prostředí polarizačních vlastností slouží Muellerova matice. Parametry S'_i mohou být vyjádřeny lineární kombinací Muellerovy matice a původním Stokesovým vektorem: [35]

$$S'_0 = m_{00}S_0 + m_{01}S_1 + m_{02}S_2 + m_{03}S_3 \quad (6.10a)$$

$$S'_1 = m_{10}S_0 + m_{11}S_1 + m_{12}S_2 + m_{13}S_3 \quad (6.10b)$$

$$S'_2 = m_{20}S_0 + m_{21}S_1 + m_{22}S_2 + m_{23}S_3 \quad (6.10c)$$

$$S'_3 = m_{30}S_0 + m_{31}S_1 + m_{32}S_2 + m_{33}S_3 \quad (6.10d)$$

V maticové formě lze zapsat jako:

$$\begin{bmatrix} S'_0 \\ S'_1 \\ S'_2 \\ S'_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{00} & m_{01} & m_{02} & m_{03} \\ m_{10} & m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{20} & m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{30} & m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (6.11)$$

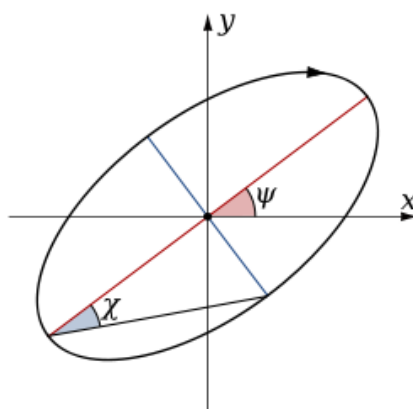
6.4 Poincarého koule

Stokesovy parametry lze také vyjádřit z polarizační elipsy pomocí úhlů χ (elipticita) a ψ (azimut), viz obrázek 6.5, a intenzity světla (parametr S_0), a to následovně:[34]

$$S_1 = S_0 \cos(2\chi) \cos(\psi) \quad (6.12a)$$

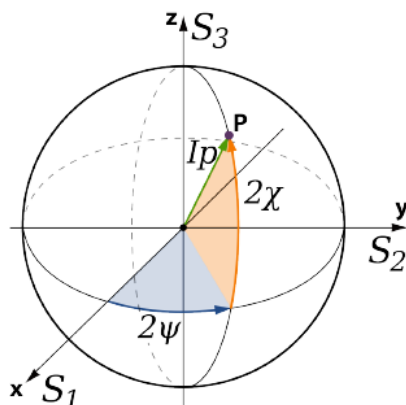
$$S_2 = S_0 \cos(2\chi) \sin(\psi) \quad (6.12b)$$

$$S_3 = S_0 \sin(2\chi) \quad (6.12c)$$



Obrázek 6.5: Důležité úhly v polarizační elipse[37]

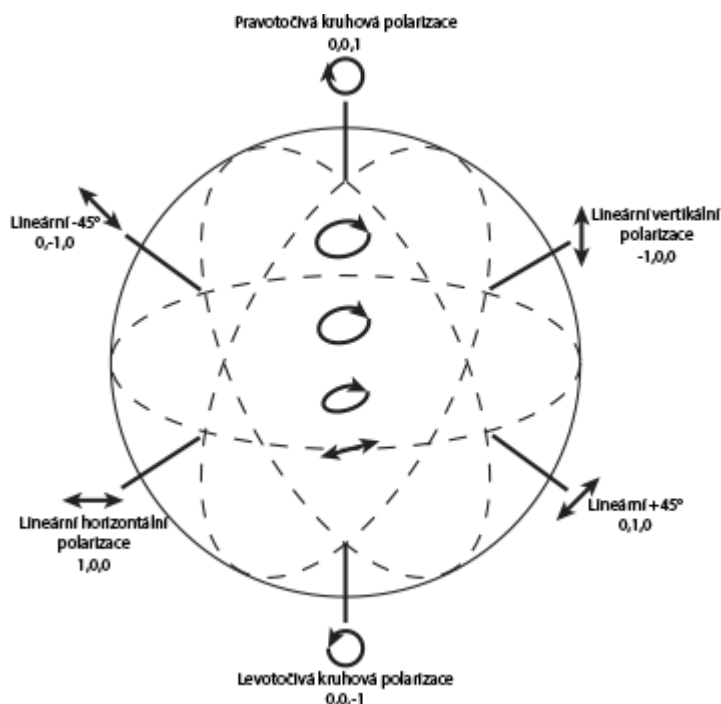
Pomocí vztahů (6.12) je možné jednotlivé stavy polarizace zobrazit pomocí jednoduché geometrické reprezentace. Parametry S_1 , S_2 , S_3 mohou být považovány jako kartézské souřadnice bodu P na kulové ploše Σ o poloměru S_0 , zvané jako Poincarého koule (zobrazena na obrázku 6.6). Podle umístění bodu P lze určit typ polarizace.[34]



Obrázek 6.6: Reprezentace stavu polarizace pomocí Poincarého koule[37]

6.4.1 Zobrazení jednotlivých typů polarizace na Poincarého kouli

Podle koncového bodu P lze určit typ polarizace. Jestliže je úhel χ kladný jedná se o pravotočivou polarizaci a naopak pokud je záporný, pak se jedná o levotočivou polarizaci. Lineárně polarizované světlo se na Poincarého kouli zobrazí na rovině x - y (parametr $S_3 = 0$). Kruhová polarizace leží na pólech osy z (pro kruhovou polarizaci jsou parametry $S_1 = S_2 = 0$ a $S_3 = \pm S_0$, viz obrázek 6.7). Ostatní body mimo výše popsané znamenají, že se jedná o eliptickou polarizaci. Pokud bod P leží na plášti koule, jedná se o úplně polarizované světlo. V opačném případě je světlo částečně polarizované.[34]



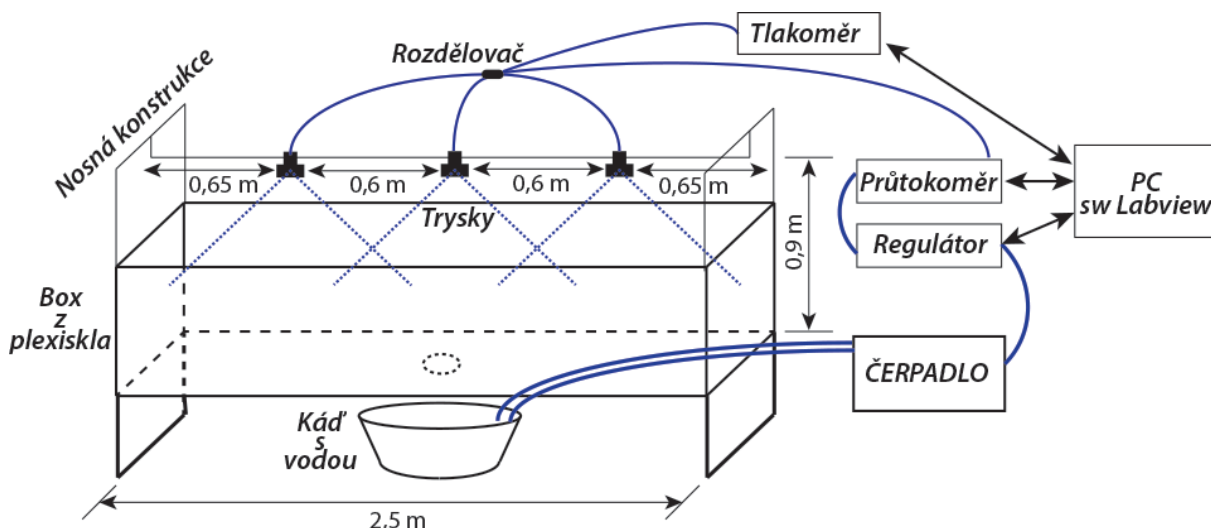
Obrázek 6.7: Typy polarizace zobrazené na Poincarého kouli[38]

7 Laboratorní box pro tvorbu dešťových kapek

Pro sledování chování optického svazku vlivem dešťových kapek byl navržen systém pro vytváření deště pomocí speciálních trysek určených k průmyslovým použitím, jako je čištění nádob atd. Bylo použito řady tří trysek, které se liší především ve velikosti rozprašovaných částic. Díky tomu jsme schopni sledovat, jak se mění parametry dle velikosti rozprašených částic.

7.1 Popis a schéma boxu

Pro vytvoření deště byl využit již hotový box z plexiskla, na který byla vytvořena nosná konstrukce pro možnost uchycení trysek. Tato konstrukce se vloží do boxu a obalí se dokola průhlednou fólií, aby se zamezilo úniku vody mimo box. Protože v laboratoři jsou omezené podmínky a nebylo možné vodu odvádět pomocí hadice do odpadu, voda odtéká do kádě, která stále cirkuluje a nedochází tak k plýtvání vody. Voda se čerpá pomocí zahradního čerpadla do rozvodu vody, který začíná regulátorem ovládaným pomocí aplikace vytvořené v programu Labview. Jedná se o program pro virtuální instrumentaci, pomocí kterého je možné vytvořit řadu real-time aplikací za pomoci speciálních knihoven a hardwarových zařízení, díky nimž dochází ke komunikaci mezi PC a danou komponentou. Pro naše potřeby byl využit prvek DAQ USB 6001, viz manuál [42], u kterého jsme využili jeden analogový výstup pro ovládání regulátoru, jeden analogový vstup pro měření tlaku a digitální čítač impulsů pro měření průtoku. Z regulátoru voda prochází průtokoměrem pro sledování množství vody vstupujících do trysek. Průtokoměr vytváří průchodem vody obdélníkové impulzy, které zachycuje DAQ karta a v programu vyhodnocujeme množství vody, které se odvíjí od počtu daných impulsů. Dále voda postupuje do jednotlivých větví, které jsou stejně dlouhé, aby byl zajištěn stejný tlak na každé tryse. Jsou použity čtyři větve, kde na třech končí trysky a jedna větev je použita pro snímání tlaku. Trysky jsou umístěny na posuvných držácích, díky kterým lze optimalizovat pokrytí boxu tvořenými kapkami či například zesílit množství kapek u vysílače či přijímače. Schéma sestaveného boxu je na obrázku níže.



Obrázek 7.1: Schéma testovacího boxu pro vytvoření deště

7.2 Součástky pro vytvoření

Pro fungování boxu bylo zapotřebí následujících součástí. Pro čerpání vody bylo zakoupeno zahradní čerpadlo Gardena typ 5000/5 o maximálním tlaku 5 barů a další komponenty jako jsou hadice a spojovací materiál. Elektronický regulátor je použit Siemens SSD31, který umožňuje nastavení otevření pomocí napětí 0 až 10 V. Průtokoměr Biotech 150189 funguje na principu generování obdélníkových impulzů, díky kterým lze spočítat aktuální průtok či celkový průtok. Dále byl použit tlakoměr od firmy B+B SENZORS typ DRTR-AL.



Obrázek 7.2: Zleva: průtokoměr, regulátor a tlakoměr

Důležitou roli hrají trysky, díky kterým dochází k vytváření kapek. Byly zakoupeny trysky od firmy HYPRO série FP [44]. Jedná se o trysky s tvarem rozstříku plného kužele. Trysky se liší velikostmi vznikajících částic, avšak tyto údaje daných rozměrů výrobce neudává. Jedná se o tyto trysky, 90B2FP6.5, 90B1FP3.5 a 90B1FP1.0.



Obrázek 7.3: Průmyslové trysky použité pro vytváření deště

Dále bylo použito mnoho drobného materiálu, jako jsou přechodky pro spojení hadic k regulátoru, samotný rozvod vody se spojkami a rozdělovačem, které jsou v průmyslu využívány pro vedení stlačeného vzduchu.

Protože výrobce hodnoty velikostí kapek neudává, lze kapky změřit pomocí vysokorychlostní kamery. Tato možnost se naskytla za pomoci firmy, která tyto kamery prezentovala na VŠB-TU. Z časového důvodu však bylo umožněno zachytit pouze jednu trysku. Na následujícím obrázku je zachycena tryska typu 90B1FP1.0. Za pomoci programu Fiji, který umožňuje měření vzdálenosti za pomoci známé referenční délky, bylo ze snímků změřeno dvacet kapek, ze kterých vyšla průměrná velikost 460 μm .

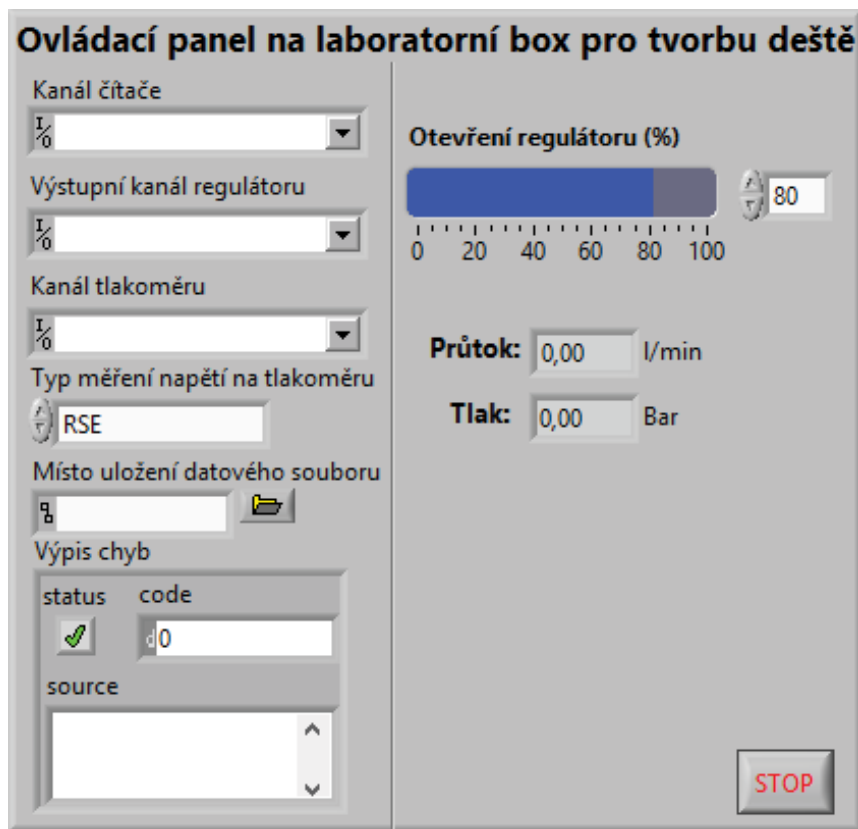


Obrázek 7.4: Záběr deště vysokorychlostní kamerou

7.3 Ovládání pomocí programu v Labview

Pro ovládání a snímání dat z použitých součástek byla vytvořena aplikace v prostředí Labview. Ovládací panel je na obrázku 7.5. Panel je rozdělen na dvě části. Vlevo je část konfigurace, kde je nutno zadat kanály, do kterých máme připojené dané zařízení. Pro ovládání regulátoru je nutné jej připojit k některému z analogových výstupů DAQ karty a dle příslušného čísla portu zadat do aplikace. Tlakoměr je nutno připojit jako analogový vstup a průtokoměr do digitálního vstupu sloužící jako čítač pulzů. U tlakoměru je ještě nutno zvolit typ měření hodnoty. V analogovém vstupu lze využít měření vůči portu, označeném jako GND (možnost RSE), anebo vůči druhému vstupnímu

analogovému portu (možnost Diferenční). Dále vybereme cestu a název souboru pro logování daných dat.



Obrázek 7.5: Čelní panel pro ovládání a snímání hodnot

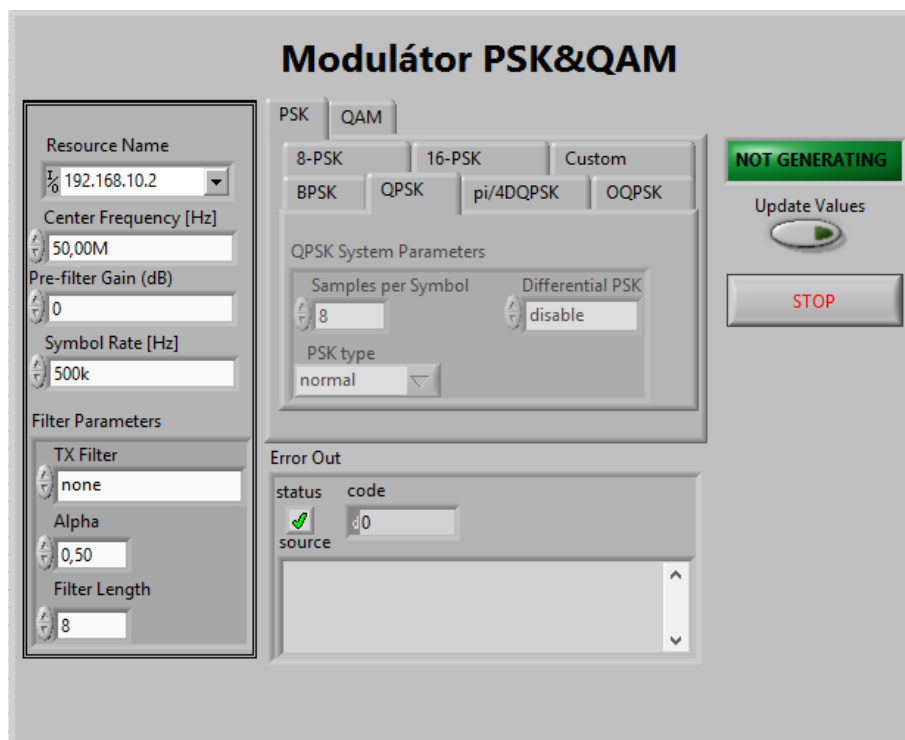
V druhé části panelu jsou indikátory měřených hodnot a panel pro ovládání otevření regulátoru v procentech. Při změně této hodnoty se přepočtou procenta na napětí, které bude na výstupu a regulátor se začne otevírat nebo zavírat. Samotný program a jeho kód jsou součástí přílohy.

8 Měření vlivu atmosférických jevů na modulovaný svazek

V následujících podkapitolách budou popsány výsledky z měření vlivu atmosférických jevů simulovaných pomocí laboratorních boxů, ve kterých jsou vytvářeny děje, které se objevují v atmosféře, jako jsou turbulence, déšť či mlha. Tyto vlivy jsou zkoumány na chování modulační chybovosti MER pro vybrané modulační schémata, které jsou vytvořeny v prostředí Labview a za pomoci USRP zařízení je možné jejich nasazení na reálné zařízení. Byly použity dvě USRP (model 2920) zařízení, jedno sloužící jako modulátor a druhý pro následnou demodulaci a k získání hodnot o dané modulaci. Byly měřeny tyto modulační schémata: QPSK, 8PSK, 16PSK, $\pi/4$ DQPSK, 4QAM, 16QAM, 32QAM a 64QAM. U daných atmosférických jevů budou následně zhodnoceny dle jejich odolnosti na určitý atmosférický jev.

Jak již bylo zmíněno, modulační schémata jsou tvořena pomocí USRP zařízení řízeného aplikací v Labview. Za pomoci ukázkového programu pro tvorbu modulací PSK byl program upraven také pro tvorbu modulací QAM a také vytvoření několika funkcionalit jako je zápis výstupních hodnot do souboru a spojení těchto programů do jednoho, pro snadnější orientaci a nenutnosti mezi programy přepínat. Byl tak vytvořen program pro modulaci a druhý pro demodulaci. Tyto programy jsou k dispozici v příloze. Pro jejich funkčnost je zapotřebí mít nainstalovanou aplikaci Labview 14 a vyšší, USRP ovladače a knihovnu Modulation Toolkit, bez které program nejde spustit.

Na obrázku 8.1 je zobrazen čelní panel programu pro modulaci. Na levé straně jsou parametry sloužící pro nastavení USRP zařízení. Pro spojení mezi USRP a počítačem je nutné si nakonfigurovat na síťové kartě (nutno podotknout, že karta musí splňovat normu Gigabit Ethernet) IP adresu z rozsahu 192.168.10.0/24, aby byla možná komunikace mezi zařízením USRP a počítačem. Pomocí programu NI-USRP Configuration Utility zjistíme IP adresy USRP zařízení, které potřebujeme před spuštěním programu modulátoru i demodulátoru vědět. Do pole *Resource Name* zadáme zjištěnou IP adresu zařízení, které má být použito jako modulátor. *Center Frequency* je nastavení nosné frekvence, kterou požadujeme (USRP 2920 umožňuje frekvence 50 MHz – 2,4 GHz). *Pre-filter Gain* určuje zesílení výstupního signálu. Dále je nutno nastavit symbolovou rychlost (*Symbol Rate*), se kterou chceme pracovat. Od symbolové rychlosti se odvíjí výsledná přenosová rychlost, a to tak, že vynásobíme symbolovou rychlost množstvím bitů tvořících jeden symbol (například čtyřstavová modulace je tvořena dvěma bity na symbol a proto při symbolové rychlosti 500 kHz je přenosová rychlost 1 Mb/s). Dalším nastavením je nastavení tvarovacího filtru. Pro mnou použité měření nebyl nastaven žádný tvarovací filtr. Dále před spuštěním je nutno vybrat z nabídky požadovaný typ modulační schématu a poté následuje spuštění programu. Pokud nenastane žádná chyba, indikuje správný chod programu kontrolka *Generating*, která změní svou barvu z tmavě zelené na světlou zářivou zelenou barvu. Pole *Error Out* vypisuje případné vzniklé chyby, které při běhu programu nastaly. V mém případě se občas vyskytla chyba ztráty paketu, kdy se program zastavil a bylo nutné jej znovu spustit.

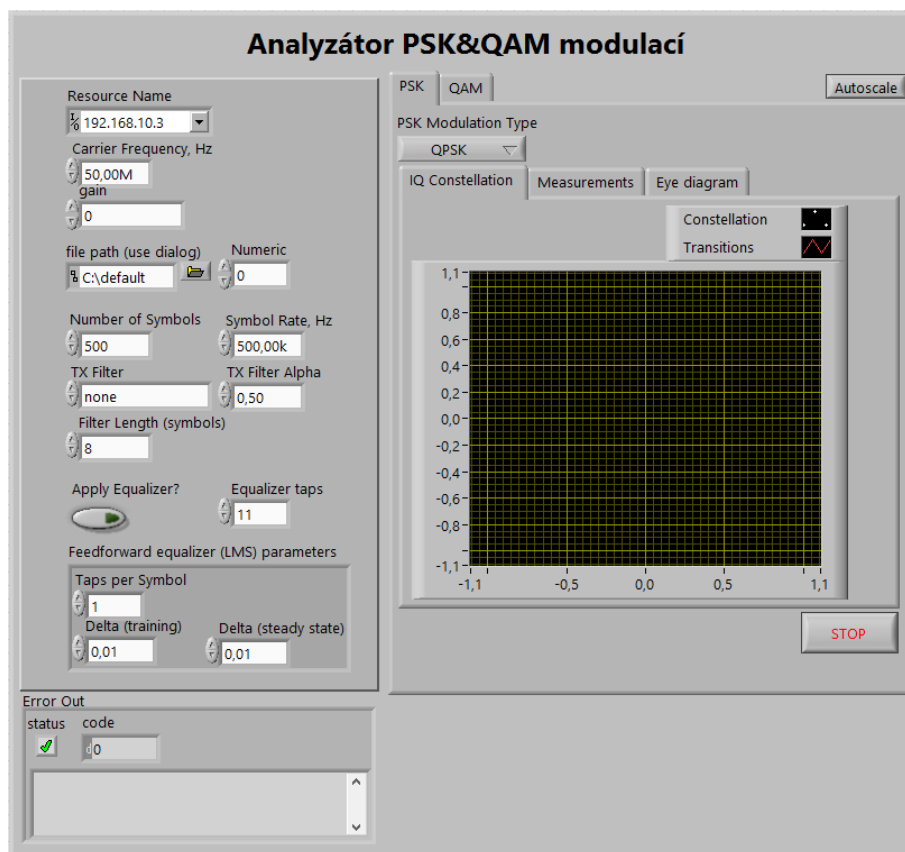


Obrázek 8.1: Aplikace pro USRP modulátor

Na obrázku 8.2 je zobrazen čelní panel programu pro demodulaci signálu. Jeho nastavení je obdobou nastavení modulátoru. Do pole *Resource Name* umístíme zjištěnou IP adresu USRP zařízení, jenž má být použito jako demodulátor. Nastavení nosné frekvence, symbolové rychlosti i nastavení tvarovacího filtru musí být shodné s nastavením hodnot u modulátoru. Pole *gain* určuje zesílení vstupního signálu do USRP. Dále pomocí dialogu *file path* vybereme cílovou cestu a název souboru do kterého se mají ukládat hodnoty. Program po spuštění kontroluje, zda daný soubor s názvem už existuje, a pokud ano, tak soubor nepřepíše, ale vytvoří jej s číselným rozšířením, aby se zamezilo přepsání uložených hodnot. Použité číslo k původnímu názvu souboru indikuje proměnná *Numeric*. Pravá strana panelu slouží k výběru typu modulace a v daném typu modulace jsou k dispozici tři záložky pro sledování vyhodnocení, a to konstelační diagram, diagram oka a číselné parametry jako MER, EVM, fázový offset a další parametry. Parametry ze záložky *Measurements* jsou při spuštění programu logovány do námi vybraného souboru. Konstelační diagram a diagram oka je možné vyexportovat kliknutím pravého tlačítka myši do příslušného grafu a vybrat volbu *export*.

Mnou nastavené parametry při měření atmosférických vlivů byly následovné:

- IP adresy zařízení: 192.168.10.2 (modulátor) a 192.168.10.3 (demodulátor)
- Nosná frekvence: 50 MHz
- Zesílení: 0 dB
- Symbolová rychlost: 500 kHz
- Tvarovací filtr: žádný
- Počet symbolů: 500



Obrázek 8.2: Aplikace pro USRP demodulátor

Modulátor ovládal laserové diody s vlnovou délkou 650 a 850 nm (typ 650543A a L850P010), které byly umístěny v aktivním chladiči LD Thorlabs TCLDM9-TE, ke kterému byl připojen proudový (Thorlabs LDC205C) a teplotní driver (Thorlabs TED200C) a také RF vstup pro modulační signál, který byl ovládán výše zmiňovaným USRP zařízením. Na straně demodulátoru byl fotodetektor Thorlabs PDA10A-EC, ze kterého byl přiváděn signál do USRP zařízení, kde byl následně demodulován a v aplikaci jej bylo možno analyzovat.

Metodika měření je následující. Byly změřeny obě vlnové délky a pro každou modulaci měření probíhalo 5 minut, ze kterého byla explorační analýzou získána střední hodnota modulační chybovosti MER, která bude použita pro porovnání jednotlivých modulací, a také budou provedeny statistické hypotézy pro zjištění statistické významnosti. V elektronické příloze jsou také uvedeny hodnoty parametru EVM, který je s parametrem MER svázán, avšak jeho chování je inverzní (při zhoršení modulace roste parametr EVM vyjádřený v procentech).

8.1 Referenční klidné (bezturbulentní) prostředí

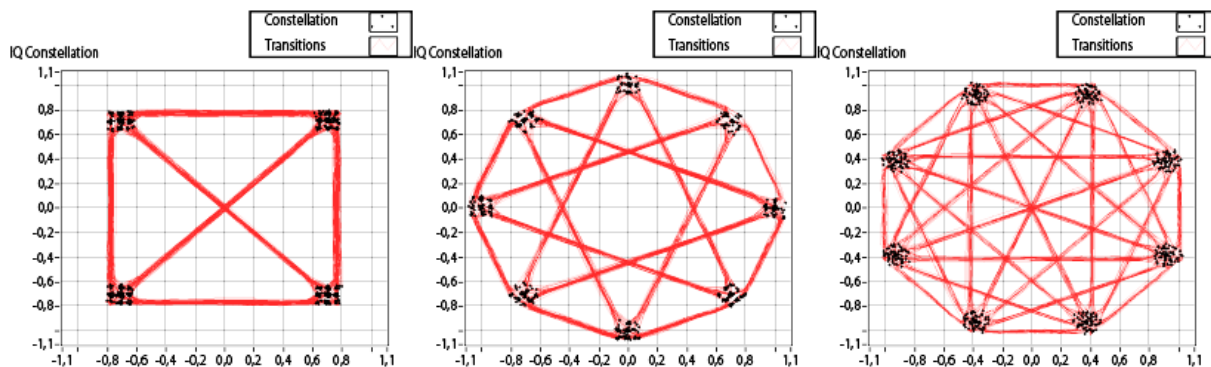
V prvním kroku byly změřeny vybrané modulace v ideálním prostředí, kde se nevyskytovaly žádné atmosférické děje, které by měly negativně působit na optický svazek. Jednalo se tak o čistou atmosféru, která by měla mít v ideálním případě nulový útlum. Uvnitř laboratorního boxu byla pokojová teplota 25 °C. Schéma měření je schématickou obdobou měření teplotních turbulentností na obrázku 8.10 s tím rozdílem, že všechny ventilátory byly vypnuté.

Explorační analýza naměřených hodnot v referenčním prostředí je v tabulce níže. Jako nejlepší modulační dle průměrné hodnoty MER se jeví u vlnové délky 650 nm modulační $\pi/4$ DQPSK. Dále se řadí modulační 8PSK, 16PSK a 4QAM, které dosahují stejné průměrné hodnoty. Hned za nimi je o dvě setiny průměrné hodnoty modulační QPSK. Vyšší modulační QAM oproti již zmíněným modulačním mají poměrně menší hodnotu MER. U vlnové délky je situace obdobná. Nejlepšího výsledku dosahuje opět $\pi/4$ DQPSK společně s 16PSK. Hned těsně za nimi následuje 4QAM a 8PSK, které se liší o setinu hodnoty MER. Za nimi je překvapivě modulační 32QAM a až za ní následuje modulační QPSK a zbylé dvě QAM modulační. Vůbec nejhorších výsledků dosahuje modulační 64QAM, která má oproti ostatním modulačním velkou směrodatnou odchylku hodnot. Diference mezi nejlepší a nejhorší modulační je v případě vlnové délky 650 nm 1,08 dB a u vlnové délky 850 nm 2,09 dB.

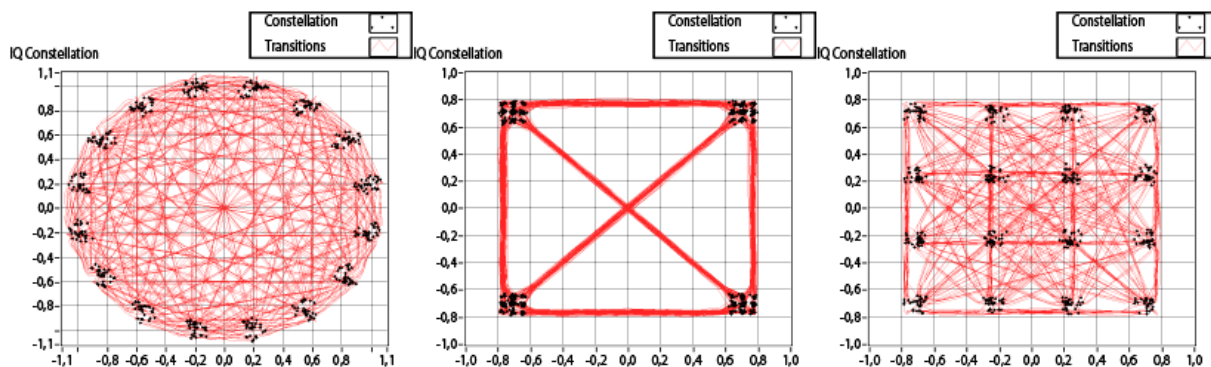
Tabulka 8.1: Explorační analýza naměřených hodnot modulační chybovosti jednotlivých modulačních

λ		MER (dB)							
		QPSK	$\pi/4$ DQPSK	8PSK	16PSK	4QAM	16QAM	32QAM	64QAM
650 nm	Průměr	24,27	24,33	24,29	24,29	24,29	23,53	23,28	23,19
	Směrodatná odchylka	0,10	0,09	0,07	0,07	0,07	0,08	0,08	1,46
	Počet vzorků	2998	2722	2716	2940	2698	2596	2680	2708
850 nm	Průměr	24,02	24,18	24,14	24,18	24,13	23,94	24,07	21,93
	Směrodatná odchylka	0,12	0,10	0,08	0,08	0,08	0,09	0,13	4,56
	Počet vzorků	2746	2714	2725	2719	2721	2731	2725	2811

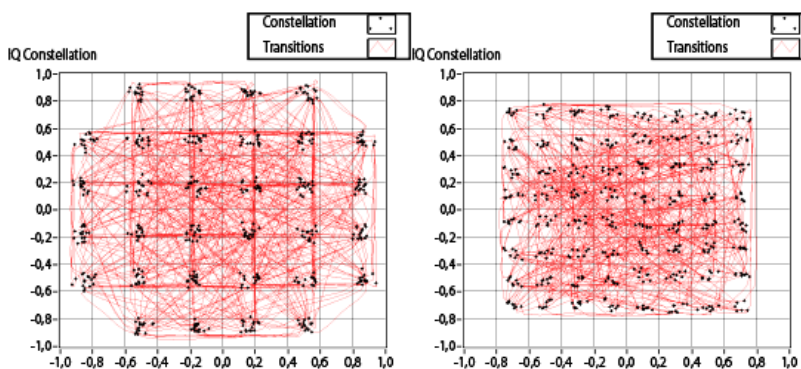
Na obrázcích níže jsou zachycené konstelační diagramy jednotlivých modulačních pro zdroj záření pracujícího na vlnové délce 850 nm.



Obrázek 8.3: Konstelační diagram zleva: QPSK, $\pi/4$ DQPSK, 8PSK



Obrázek 8.4: Konstelační diagram zleva: 16PSK, 4QAM, 16QAM



Obrázek 8.5: Konstelační diagram zleva: 32QAM, 64QAM

Nyní bude provedeno testování hypotéz pro zjištění, zdali mezi modulacemi v referenčním prostředí existuje statisticky významný rozdíl. Modulace budou rozděleny na dvě skupiny, PSK a QAM.

8.1.1 Testování hypotéz

Před samotným provedením statistické hypotézy je nutno otestovat, jestli jsou data z normálního rozdělení. Pokud všechny skupiny splňují tuto podmínku, pak může být použit test ANOVA. V opačném případě i při porušení jedné skupiny nemusíme v testování normality pokračovat dále a použije se neparametrický test pro testování mediánu Kruskal-Wallis.

8.1.1.1 PSK modulace

Normalita dat

H_0 : Data pochází z normálního rozdělení

H_A : $\neq H_0$

Použitý test: Kolmogorov-Smirnov test

Tabulka 8.2: Tabulka p-hodnot testování normality dat

λ	p-hodnota			
	QPSK	$\pi/4$ DQPSK	8PSK	16PSK
650 nm	0	0	0,24	0,01
850 nm	0	0,09	0,73	0,002

Rozhodnutí: Na základě výsledných p-hodnot zamítáme nulovou hypotézu, že data pochází z normálního rozdělení na intervalu spolehlivosti 95 %. U obou vlnových délek došlo k porušení normality dat například u modulace QPSK ($0 < 0,05$), proto nemůže být použit test ANOVA, ale bude použit test Kruskal-Wallis.

Hypotéza

H_0 : Hodnoty MER všech PSK modulací jsou stejné

H_A : $\neq H_0$

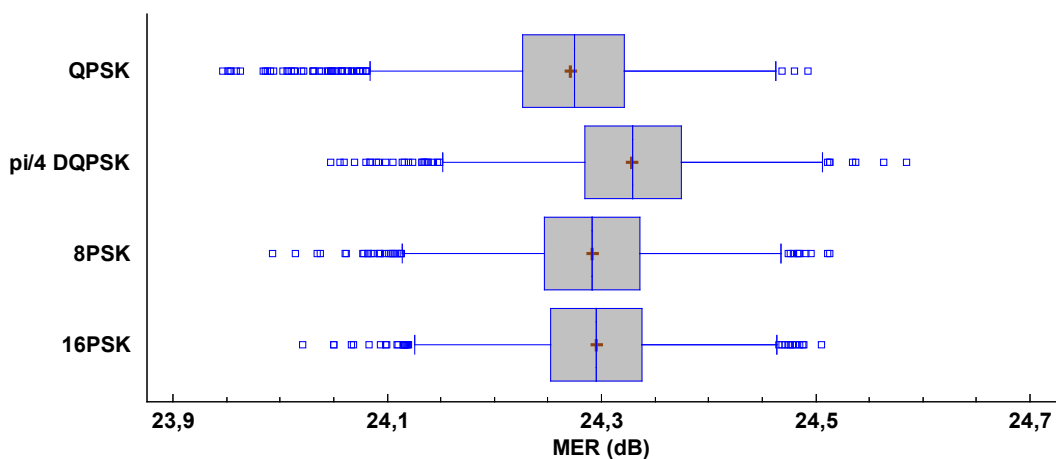
Použitý test: Kruskal-Wallis

p-hodnota 650 nm = $0 > 0,05$; Zamítáme nulovou hypotézu na hladině spolehlivosti 95 %

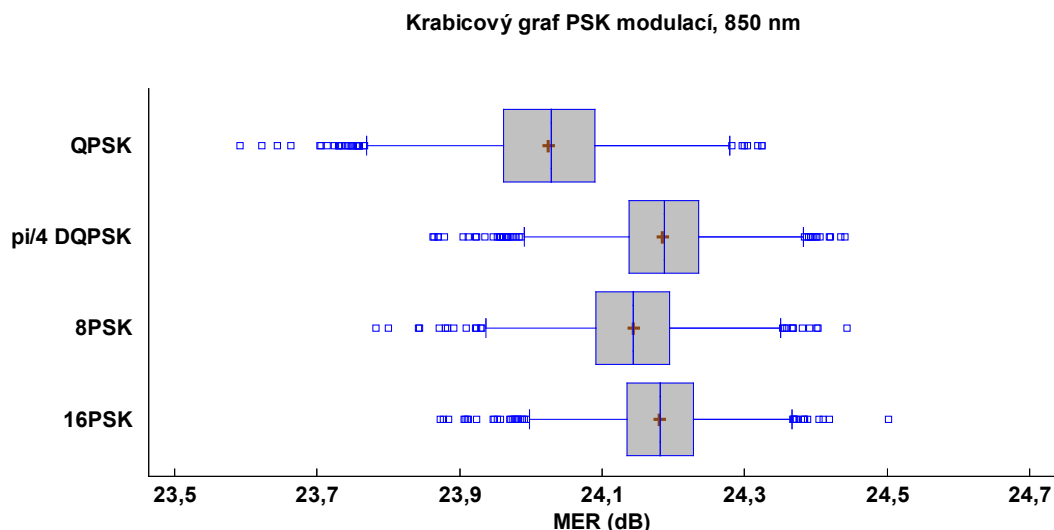
p-hodnota 850 nm = $0 > 0,05$; Zamítáme nulovou hypotézu na hladině spolehlivosti 95 %

Rozhodnutí: Na základě p-hodnot u obou vlnových délek zamítáme nulovou hypotézu. Mezi modulacemi existuje statisticky významný rozdíl. Protože byla zamítnuta nulová hypotéza, je možno provést post-hoc analýzu k určení statisticky významných skupin.

Krabicový graf PSK modulací, 650 nm



Obrázek 8.6: Krabicové grafy dle PSK modulace pro referenční prostředí, 650 nm



Obrázek 8.7: Krabicové grafy dle PSK modulace pro referenční prostředí, 850 nm

Následující dvě tabulky shrnují post-hoc analýzu. Červeně jsou označeny statisticky významně lišící se skupiny. Bílou barvou jsou označeny skupiny statisticky nevýznamné.

Tabulka 8.3: Statisticky významně lišící se skupiny (označeny červeně), 650 nm

650 nm	QPSK	$\pi/4$ DQPSK	8PSK	16PSK
QPSK				
$\pi/4$ DQPSK				
8PSK				
16PSK				

Tabulka 8.4: Statisticky významně lišící se skupiny (označeny červeně), 850 nm

850 nm	QPSK	$\pi/4$ DQPSK	8PSK	16PSK
QPSK				
$\pi/4$ DQPSK				
8PSK				
16PSK				

8.1.1.2 QAM modulace

Normalita dat

H_0 : Data pochází z normálního rozdělení

$H_A : !H_0$

Použitý test: Kolmogorov-Smirnov test

Tabulka 8.5: Tabulka p-hodnot testování normality dat

λ	p-hodnota			
	4QAM	16QAM	32QAM	64QAM
650 nm	0,006	0,71	0,07	0
850 nm	0,008	0,92	0	0

Rozhodnutí: Na základě výsledných p-hodnot zamítáme nulovou hypotézu, že data pochází z normálního rozdělení na intervalu spolehlivosti 95 %. U obou vlnových délek došlo k porušení normality dat, proto bude použit test Kruskal-Wallis.

Hypotéza

H_0 : Hodnoty MER všech QAM modulací jsou stejné

H_A : $\neq H_0$

Použitý test: Kruskal-Wallis

p-hodnota 650 nm = 0 > 0,05; Zamítáme nulovou hypotézu na hladině spolehlivosti 95 %

p-hodnota 850 nm = 0 > 0,05; Zamítáme nulovou hypotézu na hladině spolehlivosti 95 %

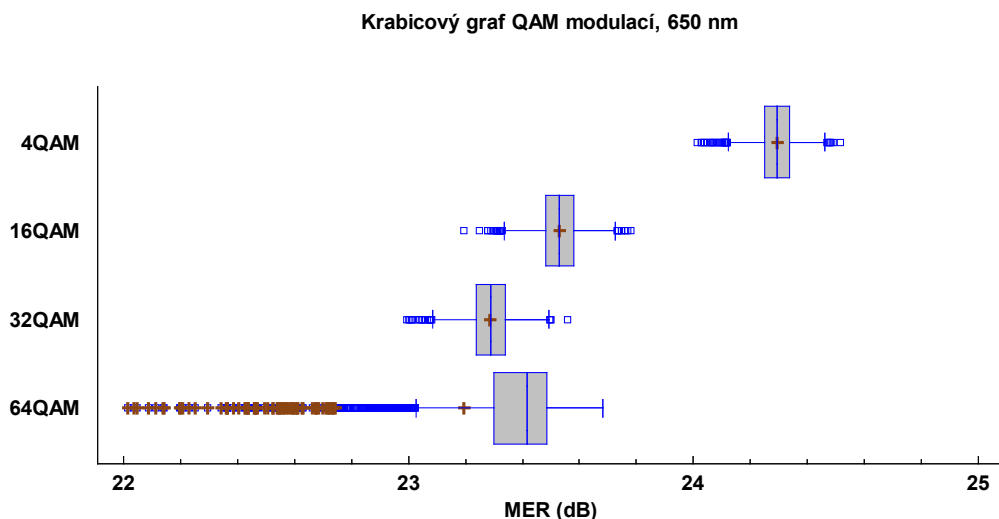
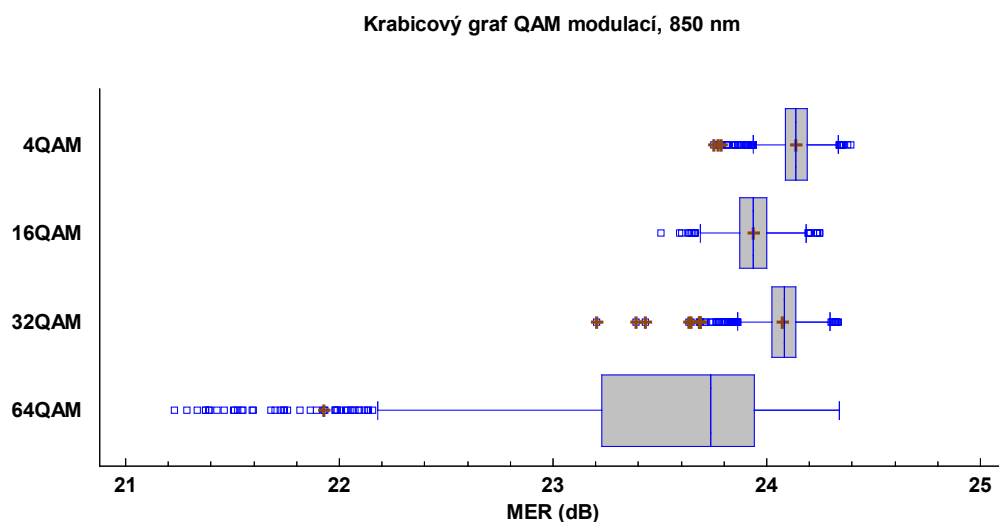
Rozhodnutí: Na základě p-hodnot u obou vlnových délek zamítáme nulovou hypotézu. Mezi modulacemi existuje statisticky významný rozdíl. Protože byla zamítnuta nulová hypotéza, je možno provést post-hoc analýzu k určení statisticky významných skupin. Na obrázku 8.8 a obrázku 8.9 jsou zobrazeny krabicové grafy dle vlnové délky, ze kterých lze vidět, že dané skupiny neleží přesně nad sebou a tudíž je mezi nimi statisticky významný rozdíl.

Tabulka 8.6: *Statisticky významně lišící se skupiny (označeny červeně), 650 nm*

650 nm	4QAM	16QAM	32QAM	64QAM
4QAM				
16QAM				
32QAM				
64QAM				

Tabulka 8.7: *Statisticky významně lišící se skupiny (označeny červeně), 850 nm*

850 nm	4QAM	16QAM	32QAM	64QAM
4QAM				
16QAM				
32QAM				
64QAM				

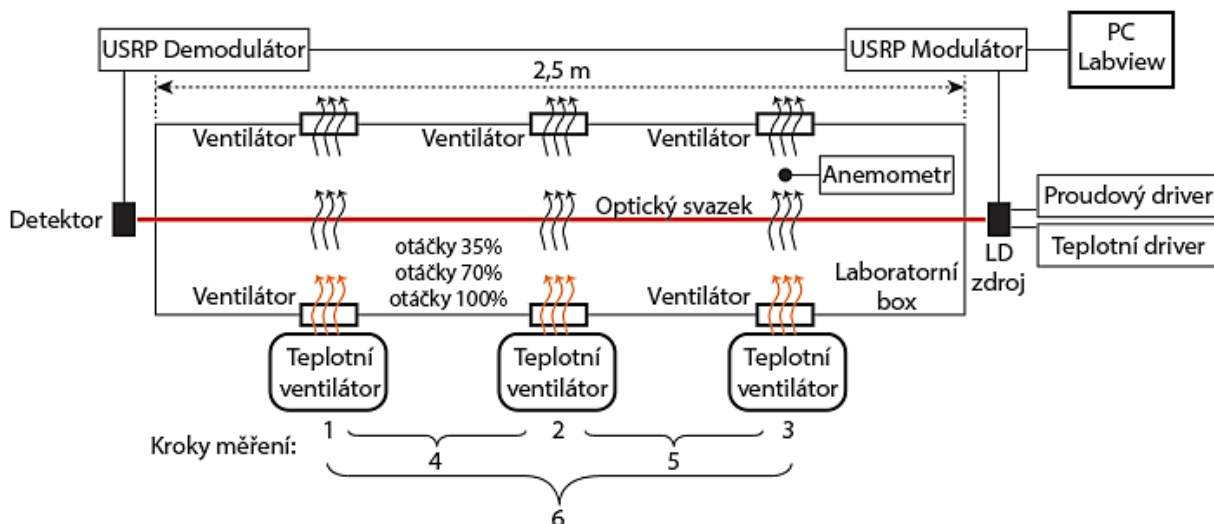
Obrázek 8.8: *Krabicové grafy dle QAM modulace pro referenční prostředí, 650 nm*Obrázek 8.9: *Krabicové grafy dle QAM modulace pro referenční prostředí, 850 nm*

Jak je z výše uvedených krabicových grafů vidět, u modulace 64QAM dochází k velkému rozptylu dat oproti jiným modulacím. Také lze vidět několik odlehklých hodnot. Protože však neznáme jejich příčinu a jsou poměrně blízké dolnímu kvantilu, jsou ponechány.

8.2 Teplotní turbulence

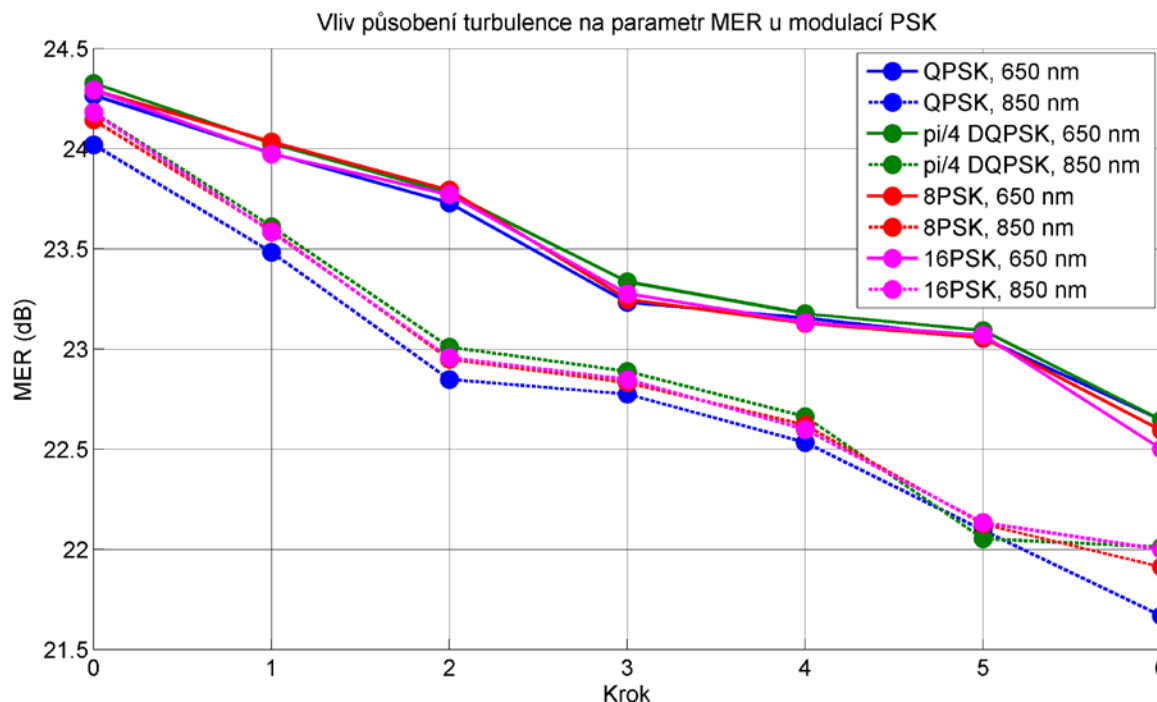
V této části byly vytvářeny v laboratorním boxu teplotní turbulence pomocí teplotních ventilátorů (SOLAC TH 8325 a EMPIRE CTH-5000) a ventilátorů zabudovaných na stranách boxu, které tak vytváří větrný průduch skrze box. Ventilátory jsou připojeny k ovladači otáček, díky kterému je možno regulovat otáčky daných ventilátorů. Tím lze zajistit různou rychlost proudění ohřátého vzduchu z teplotních ventilátorů, které vstupuje skrze ventilátor do trajektorie optického svazku. Měření probíhalo dle schématu na obrázku 8.10. Měření se skládalo ze šesti částí a každá část byla změřena pro tři úrovně otáček ventilátorů. V prvních třech krocích byl zapnut pouze jeden teplotní turbulentní zdroj. V každém kroku byl zdroj turbulence umístěn do jiného místa z důvodu testování hypotézy, zdali má v místo turbulence vliv na modulační chybovost (liší-li se parametr MER

v případě zdroje turbulence u detektoru, LD zdroje a uprostřed mezi nimi). Díky různým otáčkám ventilátoru mohla být testována hypotéza, jestli má vliv rychlost a teplota proudění na výslednou hodnotu MER. Ve čtvrtém a pátém kroku byl přidán druhý teplotní ventilátor, čímž byla zajištěna větší dráha, na které byl svazek turbulence ovlivněn. V posledním šestém kroku byl přidán také třetí zdroj teplotní turbulence a na svazek tak turbulence působily v celé jeho dráze. Mohla tak být testována hypotéza, má-li vliv počet turbulentních zdrojů ke snížení parametru MER. Celé měření bylo poté zopakováno s druhou vlnovou délkou. V následujících podkapitolách jsou popsány statistické závěry z tohoto měření.

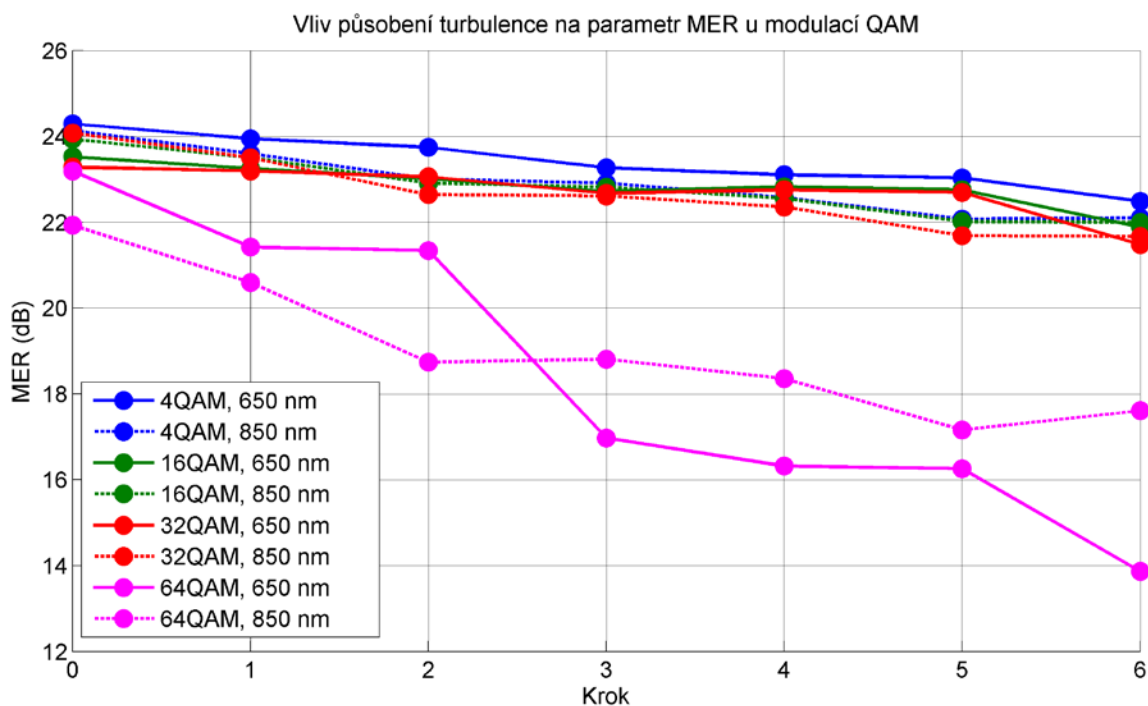


Obrázek 8.10: Schéma měření turbulentních vlivů na modulační formát

Explorační analýza naměřených hodnot jednotlivých kroků pro obě vlnové délky je shrnuta v tabulkách uvedené v příloze, tabulka B.1 a B.2 (číslo před podtržítkem je umístění teplotního ventilátoru dle schématu měření a číslo za podtržítkem otáčky 1 = 35 %, 3 = 100 %). V případě otáček ventilátorů 35 % se dosahovalo průměrné teploty 50 °C a proudu vzduchu 4,8 m/s, u otáček 70 % průměrné teploty 46,5 °C a proudu vzduchu 7 m/s a u otáček 100 % průměrné teploty 43,5 °C a proudu vzduchu 9,5 m/s. Z tabulky jsou vytvořené grafy pro ilustraci změny parametru MER dle jednotlivých kroků měření pro stupeň otáček 35 % (viz obrázek 8.11 a obrázek 8.12). Při tomto nastavení otáček právě ve většině případů nastávalo největší zhoršení modulační chybovosti. Teplotní ohřívač měl konstantní otáčky, ale vlivem zvýšení otáček ventilátorů docházelo k ochlazení teplého vzduchu a proto při vyšších otáčkách je vždy nižší teplota. Z toho vyplývá, že větší vliv na zhoršení parametrů modulace má teplota turbulence než rychlost proudu vzduchu.



Obrázek 8.11: Graf parametru MER PSK modulací dle kroku měření (viz schéma na str. - 58 -)



Obrázek 8.12: Graf parametru MER QAM modulací dle kroku měření (viz schéma na str.- 58 -)

Z předešlých grafů lze vyvodit pár poznatků. V případě zhodnocení vlivu vlnové délky vychází odolnější vlnová délka 650 nm, u které dochází k menším rozdílům mezi referenčním klidným prostředím a prostředím s turbulence. Dále všechny průběhy mají klesající průběh dle kroku varianty měření. Z toho vyplývá, že u jednoho zdroje turbulence také záleží na umístění tohoto zdroje. Je rozdíl, pokud je zdroj turbulence umístěn u detektoru, zdroje či mezi nimi. Také zvýšení počtu

zdrojů turbulencí vedlo k dalšímu poklesu parametru MER. V případě dvou turbulentních zdrojů u vlnové délky 650 nm nebyl rozdíl v umístění těchto zdrojů tak výrazný jako v případě vlnové délky 850 nm, kde umístění dvou zdrojů turbulence u vysílače znamenalo daleko větší pokles parametru MER. Přidáním třetího zdroje turbulence bylo zapříčiněno to, že optický svazek byl ovlivněn po celé jeho dráze, což znamenalo dosažení nejhorších hodnot kvality modulace. Při zhodnocení jednotlivých modulací dosahují nejlepších hodnot modulace PSK a srovnatelná je také modulace 4QAM. Modulace QAM s vyšším počtem stavů již byly poměrně citlivé na turbulentní vlivy, což se také projevilo zvýšené směrodatné odchylce naměřených dat, především 32QAM a 64QAM. Vůbec nejhorší je dle očekávání 64QAM, která oproti ostatním modulacím dosahuje velice nízké hodnoty MER. Mezi modulacemi PSK nedocházelo k výraznějším rozdílům mezi středními hodnotami, avšak nejlepších výsledků dosahovala modulace $\pi/4$ DQPSK.

Tabulka 8.8: *Pokles mezi referenčním prostředím a turbulentním prostředím*

	Krok	MER (dB)					
		1 1	2 1	3 1	4 1	5 1	6 1
QPSK	650 nm	0,29	0,54	1,04	1,11	1,21	1,62
	850 nm	0,54	1,17	1,25	1,49	1,93	2,35
$\pi/4$ DQPSK	650 nm	0,30	0,55	0,99	1,15	1,23	1,68
	850 nm	0,57	1,17	1,29	1,52	2,13	2,17
8PSK	650 nm	0,26	0,50	1,04	1,16	1,24	1,70
	850 nm	0,55	1,19	1,31	1,52	2,01	2,23
16PSK	650 nm	0,32	0,52	1,02	1,16	1,22	1,79
	850 nm	0,60	1,22	1,33	1,58	2,05	2,18
4QAM	650 nm	0,35	0,55	1,02	1,19	1,26	1,80
	850 nm	0,53	1,12	1,22	1,55	2,06	2,03
16QAM	650 nm	0,28	0,51	0,81	0,71	0,77	1,64
	850 nm	0,44	1,03	1,12	1,39	1,93	1,94
32QAM	650 nm	0,09	0,23	0,61	0,53	0,59	1,81
	850 nm	0,57	1,43	1,46	1,71	2,38	2,40
64QAM	650 nm	1,77	1,86	6,22	6,87	6,93	9,33
	850 nm	1,33	3,19	3,12	3,57	4,77	4,32

V tabulce 8.8 jsou vypočteny rozdíly mezi referenčním a turbulentním prostředím pro kroky s 35 % otáčkami ventilátoru. Celá tabulka pro všechny kroky je uvedena v příloze B.3. Jak již bylo zmíněno, u vlnové délky 850 nm nastávaly daleko větší difference, což dokazují hodnoty v tabulce výše. V případě turbulentního zdroje u detektoru docházelo k diferencím maximálně o 0,5 dB s výjimkou 64QAM, která má difference s dalšími modulacemi nesrovnatelné. Při posouvání zdroje a také počtu turbulence se difference zvětšovali. V případě nejhoršího stavu tří zdrojů turbulencí se difference pohybují od hodnot 1,62 po 2,4 dB vyjma 64QAM. Nejmenší diferencí vzhledem k referenčnímu prostředí u nejhoršího stavu dosáhla modulace QPSK při použití vlnové délky 650 nm a u 850 nm překvapivě 16QAM.

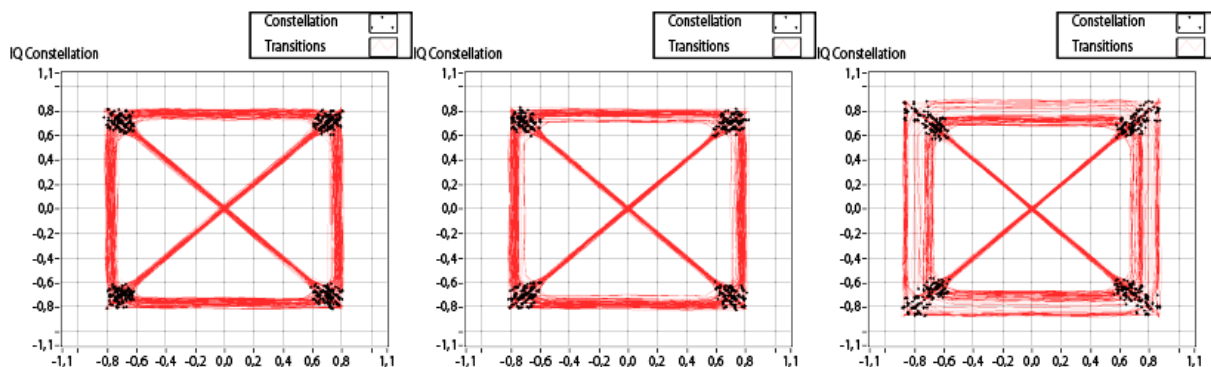
V další následující tabulce je zhodnocení ve formě celkového průměru parametru MER ze všech měřených kroků pro zhodnocení, která modulace dosahovala nejvyšší hodnoty a která naopak nejnižší. U vlnové délky dosáhla nejvyšší hodnoty parametru MER modulace $\pi/4$ DQPSK a nejnižší 64QAM. Obecně se potvrdilo, že modulace s menším počtem stavů patří mezi nejlepší, kdežto modulace s větším počtem stavů jsou náchylnější na děje v atmosféře. U vlnové délky 850 nm dosáhla

nejvyšší průměrné hodnoty stejná modulace jako u 650 nm. O setinu horší průměr měli shodně modulace 8 a 16PSK. Nejhorší byla opět 64QAM. Průměrné hodnoty všech modulací u vlnové délky 850 nm byly vyrovnanější než u vlnové délky 650 nm, kde byli rozdíly větší.

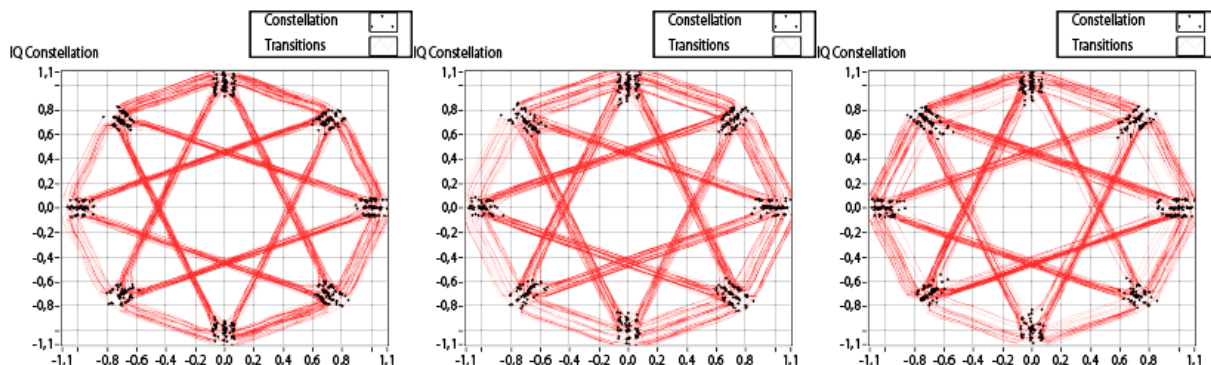
Tabulka 8.9: Celkový průměr hodnot MER (dB) ze všech kroků měření a rozdělení pořadí

	QPSK	$\pi/4$ DQPSK	8PSK	16PSK	4QAM	16QAM	32QAM	64QAM
650 nm	23,28	23,31	23,29	23,25	23,26	22,74	22,62	17,69
Pořadí	3	1	2	5	4	6	7	8
850 nm	22,72	22,77	22,76	22,76	22,75	22,69	22,51	18,47
Pořadí	5	1	2 - 3	2 - 3	4	6	7	8

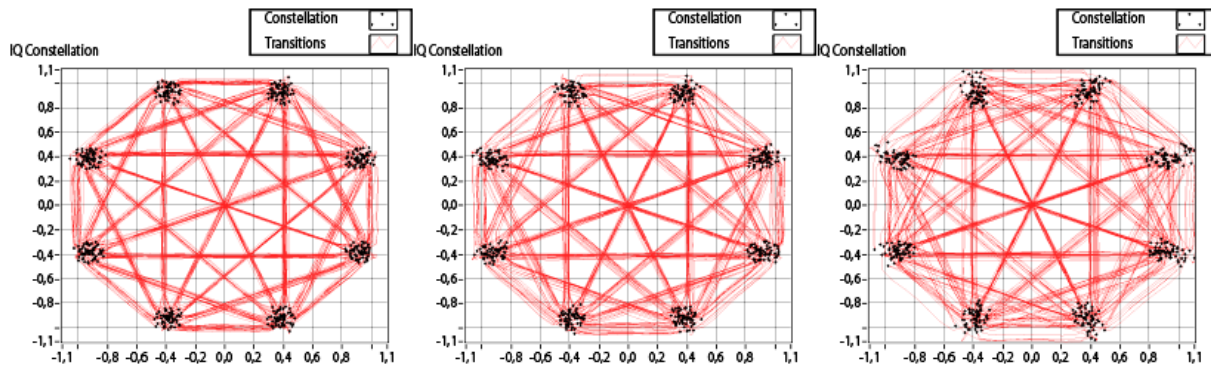
Níže jsou zachyceny konstelační diagramy dle počtu turbulentních zdrojů.



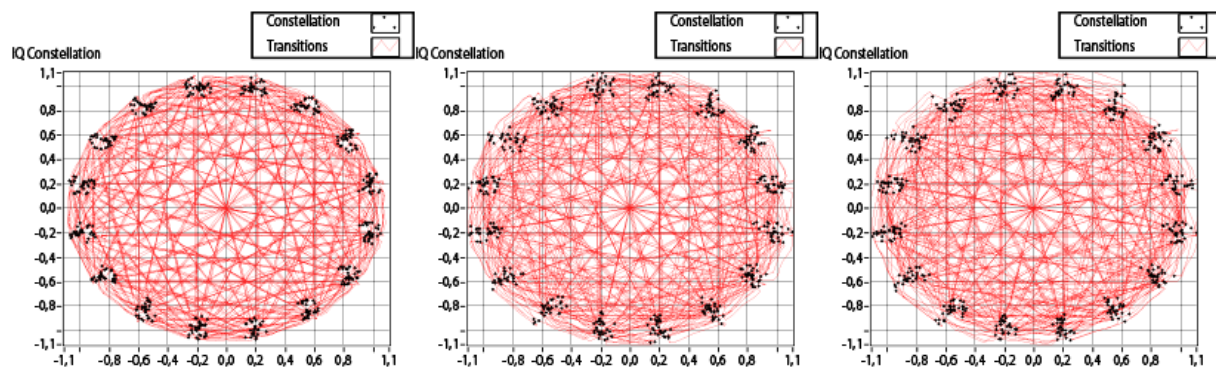
Obrázek 8.13: Konstelační diagram QPSK pro 1, 2 a 3 turbulentní zdroje



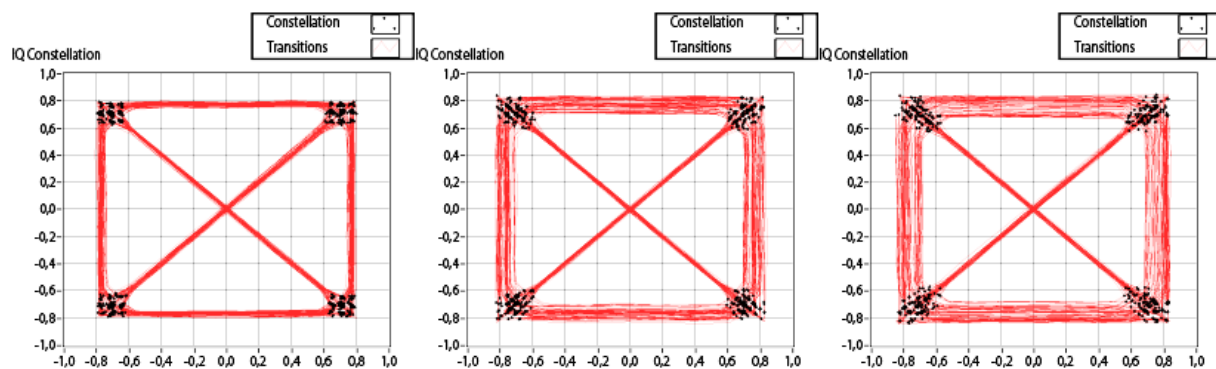
Obrázek 8.14: Konstelační diagram $\pi/4$ DQPSK pro 1, 2 a 3 turbulentní zdroje



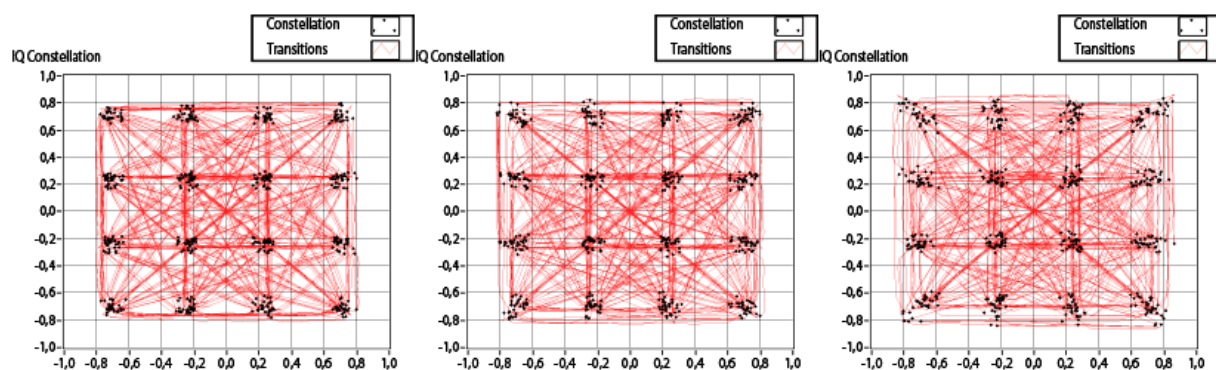
Obrázek 8.15: Konstelační diagram 8PSK pro 1, 2 a 3 turbulentní zdroje



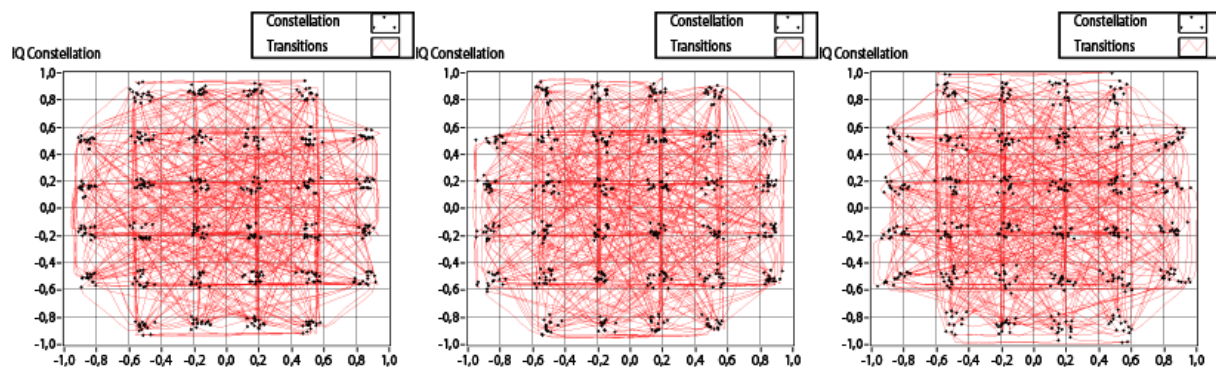
Obrázek 8.16: Konstelační diagram 16PSK pro 1, 2 a 3 turbulentní zdroje



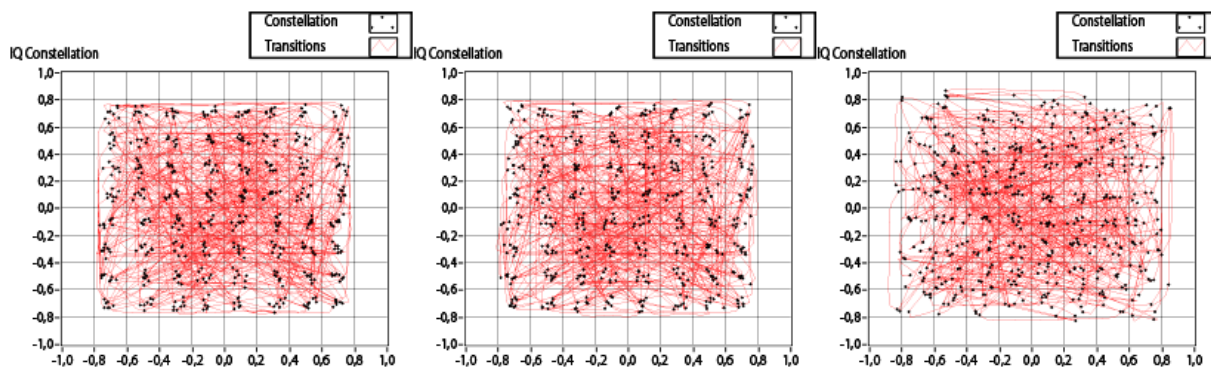
Obrázek 8.17: Konstelační diagram 4QAM pro 1, 2 a 3 turbulentní zdroje



Obrázek 8.18: Konstelační diagram 16QAM pro 1, 2 a 3 turbulentní zdroje



Obrázek 8.19: Konstelační diagram 32QAM pro 1, 2 a 3 turbulentní zdroje



Obrázek 8.20: Konstelační diagram 64QAM pro 1, 2 a 3 turbulentní zdroje

Z výše uvedených konstelačních diagramů je patrné, jak turbulence mají vliv na zhoršení parametrů modulační. Lze vidět, jak se jednotlivé symboly vlivem turbulencí rozprostírají, což může mít za následek, že jednotlivé symboly mohou zasáhnout do rozhodovacího pole jiného symbolu. Tento jev je možno pozorovat především u modulační 64QAM na grafu pro tři turbulentní zdroje.

8.2.1 Testování hypotéz

Budou testovány hypotézy, jestli je statisticky významný rozdíl mezi klidným a turbulentním prostředím, vlivem změny teploty a rychlosti proudu vzduchu, místem turbulence a počtem turbulentních zdrojů.

8.2.1.1 PSK modulační

Nejprve bude otestována hypotéza, zdali je statisticky významný rozdíl mezi klidným a turbulentním prostředím. U každé modulační bude testován referenční krok s krokem jedna, u kterého docházelo k nejmenšímu ovlivnění. Pokud bude statisticky významný rozdíl již v tomto kroku, pak bude statistický významný rozdíl i v krocích ostatních. Normalita dat byla u většiny modulačních zamítnuta již v tabulce 8.2, ale pro další hypotézy bude třeba ověřit normalitu, a tak bude provedeno testování normality pro první krok. Pokud bude normalita zamítnuta, u dalších hypotéz již třeba nebude normalitu testovat.

Normalita dat

H_0 : Data pochází z normálního rozdělení

H_A : $\neg H_0$

Použitý test: Kolmogorov-Smirnov test

Tabulka 8.10: Tabulka p-hodnot testování normality dat

		krok 1_1	krok 1_2	krok 1_3
QPSK	650 nm	0	0	0
	850 nm	0	0	0
$\pi/4$ DQPSK	650 nm	0	0	0
	850 nm	0	0	0
8PSK	650 nm	0	0	0
	850 nm	0	0	0
16PSK	650 nm	0	0	0

	850 nm	0	0	0
--	---------------	---	---	---

Rozhodnutí: Na základě p-hodnot jsou na intervalu spolehlivosti 95 % zamítnuty nulové hypotézy, že data pochází z normálního rozdělení. Pro další testování tak budou použity neparametrické testy.

Hypotéza

H_0 : Hodnoty MER jsou pro referenční a turbulentní prostředí stejné

H_A : $\neq H_0$

Použitý test: Kruskal-Wallis

Tabulka 8.11: *Tabulka p-hodnot Kruskal-Wallisova testu*

λ	p-hodnota			
	QPSK	$\pi/4$ DQPSK	8PSK	16PSK
650 nm	0	0	0	0
850 nm	0	0	0	0

Rozhodnutí: Na základě p-hodnot v tabulce výše zamítáme nulovou hypotézu u všech PSK modulací. Mezi referenčním a turbulentním prostředím jsou statisticky významné rozdíly. Nyní by se mohla provést post-hoc analýza významných skupin, ale jedna z dalších hypotéz je vliv teploty a rychlosti turbulence, proto bude nyní vynechána.

Hypotéza

H_0 : Různé umístění turbulentního zdroje nemá vliv na výslednou hodnotu MER

H_A : $\neq H_0$

Použitý test: Kruskal-Wallis

Tabulka 8.12: *Tabulka p-hodnot Kruskal-Wallisova testu*

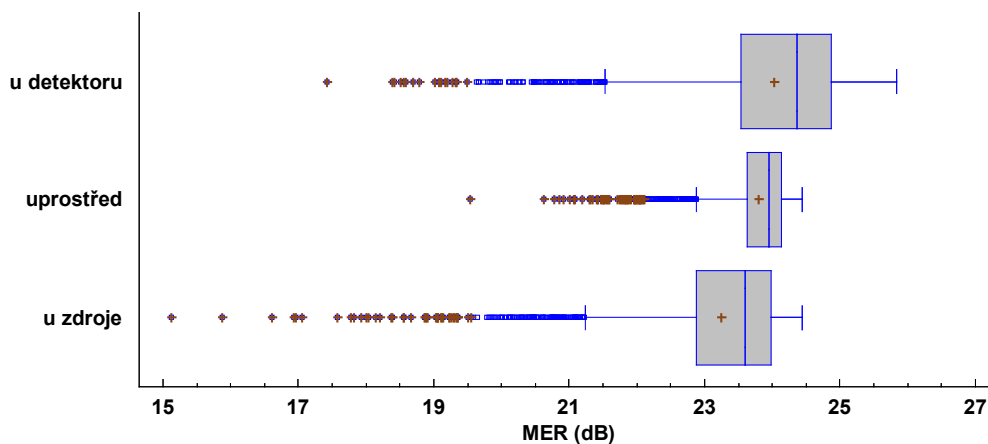
λ	p-hodnota			
	QPSK	$\pi/4$ DQPSK	8PSK	16PSK
650 nm	0	0	0	0
850 nm	0	0	0	0

Rozhodnutí: Na základě p-hodnot (všechny p-hodnoty $< 0,05$) zamítáme nulovou hypotézu na intervalu spolehlivosti 95 %. Umístění zdroje turbulence má statisticky významný vliv. V následující tabulce je post-hoc analýza významných skupin.

Tabulka 8.13: *Statisticky významně lišící se skupiny (označeny červeně)*

	Umístění	Detektor-Zdroj	Detektor-Uprostřed	Uprostřed-Zdroj
QPSK	650 nm			
	850 nm			
$\pi/4$ DQPSK	650 nm			
	850 nm			
8PSK	650 nm			
	850 nm			
16PSK	650 nm			
	850 nm			

Krabicový graf parametru MER modulační 8PSK dle umístění zdroje turbulence, 650 nm



Obrázek 8.21: Krabicový graf pro porovnání místa zdroje turbulence u modulační 8PSK

V tabulce 8.13 vidíme, že statisticky významné skupiny jsou u všech modulací mezi všemi třemi umístěními turbulentního zdroje. Na obrázku 8.21 je ukázka, jak vypadá rozložení hodnot v případě různého umístění zdroje turbulence.

Hypotéza

H_0 : Počet turbulentních zdrojů nemá vliv na výslednou hodnotu MER

H_A : $\neq H_0$

Použitý test: Kruskal-Wallis

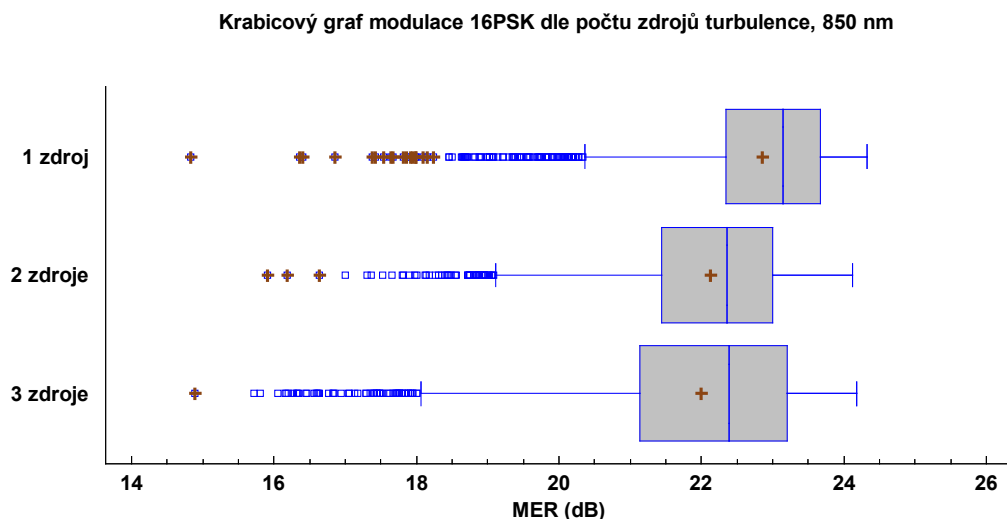
Tabulka 8.14: Tabulka p-hodnot Kruskal-Wallisova testu

λ	p-hodnota			
	QPSK	$\pi/4$ DQPSK	8PSK	16PSK
650 nm	0	0	0	0
850 nm	0	0	0	0

Rozhodnutí: Na základě p-hodnot v tabulce výše zamítáme nulovou hypotézu. Počet zdrojů má statisticky významný vliv na hladině spolehlivosti 95 %. V následující tabulce je uvedena post-hoc analýza významných skupin (statisticky významné skupiny označeny červenou barvou).

Tabulka 8.15: Statisticky významně lišící se skupiny (označeny červeně)

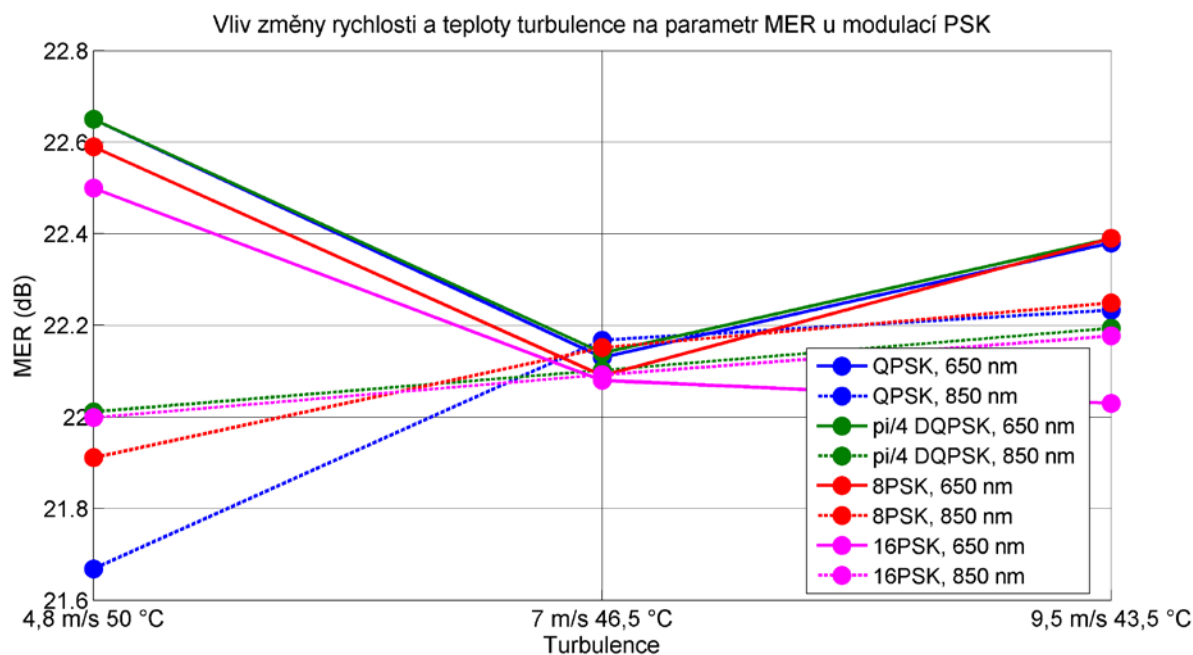
	Počet	1-2	1-3	2-3
QPSK	650 nm			
	850 nm			
$\pi/4$ DQPSK	650 nm			
	850 nm			
8PSK	650 nm			
	850 nm			
16PSK	650 nm			
	850 nm			



Obrázek 8.22: *Krabicový graf pro porovnání počtu zdrojů turbulence u modulace 16PSK*

Na obrázku 8.22 je ukázkový krabicový graf pro modulaci 16PSK s použitou vlnovou délkou 850 nm, na kterém vidíme, že mezi skupinou se dvěma a třemi zdroji turbulence není statisticky významný vliv, což odhalila post-hoc analýza.

Další a poslední hypotézou je vliv změny teploty a rychlosti turbulence. Na následujícím grafu je zobrazen průběh pro šestý krok se třemi zdroji turbulence dle její teploty a rychlosti. V případě vlnové délky 650 nm dochází při první změně teploty a rychlosti ke zhoršení, ale po další změně už dochází ke zlepšení hodnoty MER. U vlnové délky 850 nm je situace taková, že každou změnou teploty a rychlosti turbulence došlo ke zlepšení výsledné hodnoty MER. Jestli jsou tyto rozdíly statisticky významné, určí následující hypotéza. Hypotéza je provedena pro první krok, kdy jsou rozdíly nejmenší, a pro šestý krok, kdy jsou rozdíly naopak největší. Pokud dojde k statisticky významným rozdílům v těchto krocích, dá se předpokládat stejné výsledky pro ostatní kroky.



Obrázek 8.23: *Vliv parametru MER na teplotě a rychlosti turbulence pro modulace PSK*

Hypotéza

H_0 : Změna teploty a rychlosti turbulence nemá vliv na výslednou hodnotu MER

H_A : $\neq H_0$

Použitý test: Kruskal-Wallis

Tabulka 8.16: *Tabulka p-hodnot Kruskal-Wallisova testu*

	p-hodnota							
	QPSK		$\pi/4$ DQPSK		8PSK		16PSK	
krok	1	6	1	6	1	6	1	6
650 nm	0	0	0	0	0	0	0	0
850 nm	0	0	0	0,61	0	0	0	0,30

Rozhodnutí: Na základě p-hodnot zamítáme nulovou hypotézu vyjma situace u vlnové délky 850 nm při šestém kroku modulace $\pi/4$ DQPSK a 16PSK. V ostatních případech je rozdíl statisticky významný na hladině spolehlivosti 95 %. Následuje post-hoc analýza, které skupiny jsou statisticky významné (skupina 1 – 50 °C 4,8 m/s, skupina 2 – 46,5 °C 7 m/s a skupina 3 – 43,5 °C 9,5 m/s).

Tabulka 8.17: *Statisticky významně lišící se skupiny (označeny červeně)*

	Turbulence	krok 1			krok 6		
		1 - 2	1 - 3	2 - 3	1 - 2	1 - 3	2 - 3
QPSK	650 nm						
	850 nm						
$\pi/4$ DQPSK	650 nm						
	850 nm				Nezamítnutá H_0		
8PSK	650 nm						
	850 nm						
16PSK	650 nm						
	850 nm				Nezamítnutá H_0		

Z výsledné post-hoc analýzy je zřejmé, že ve většině případů je změna teploty i rychlosti turbulence statisticky významná. Jen v pár případech je mezi určitou skupinou, ve většině případů druhou a třetí, statisticky nevýznamný rozdíl.

8.2.1.2 QAM modulace

Tak jako u PSK modulací, bude otestována normalita dat pro první krok měření. Pokud bude normalita zamítnuta, u dalších hypotéz již třeba nebude normalitu testovat. Budou provedeny identické hypotézy.

Normalita dat

H_0 : Data pochází z normálního rozdělení

H_A : $\neq H_0$

Použitý test: Kolmogorov-Smirnov test

Tabulka 8.18: *Tabulka p-hodnot testování normality dat*

		krok 1_1	krok 1_2	krok 1_3
4QAM	650 nm	0	0	0
	850 nm	0	0	0
16QAM	650 nm	0	0	0
	850 nm	0	0	0
32QAM	650 nm	0	0	0
	850 nm	0	0	0
64QAM	650 nm	0	0	0
	850 nm	0	0	0

Rozhodnutí: Na základě p-hodnot jsou na intervalu spolehlivosti 95 % zamítnuty nulové hypotézy, že data pochází z normálního rozdělení. Pro další testování bude použit Kruskal-Wallisův test.

Hypotéza

H_0 : Hodnoty MER jsou pro referenční a turbulentní prostředí stejné

H_A : $\neq H_0$

Použitý test: Kruskal-Wallis

Tabulka 8.19: *Tabulka p-hodnot Kruskal-Wallisova testu*

λ	p-hodnota			
	4QAM	16QAM	32QAM	64QAM
650 nm	0	0	0	0
850 nm	0	0	0	0

Rozhodnutí: Na základě p-hodnot uvedené v tabulce výše zamítáme nulovou hypotézu u všech QAM modulací. Mezi referenčním a turbulentním prostředím jsou statisticky významné rozdíly.

Hypotéza

H_0 : Různé umístění turbulentního zdroje nemá vliv na výslednou hodnotu MER

H_A : $\neq H_0$

Použitý test: Kruskal-Wallis

Tabulka 8.20: *Tabulka p-hodnot Kruskal-Wallisova testu*

λ	p-hodnota			
	4QAM	16QAM	32QAM	64QAM
650 nm	0	0	0	0
850 nm	0	0	0	0

Rozhodnutí: Na základě p-hodnot zamítáme nulovou hypotézu na intervalu spolehlivosti 95 %. Umístění zdroje turbulencí má statisticky významný vliv. V následující tabulce je post-hoc analýza významných skupin.

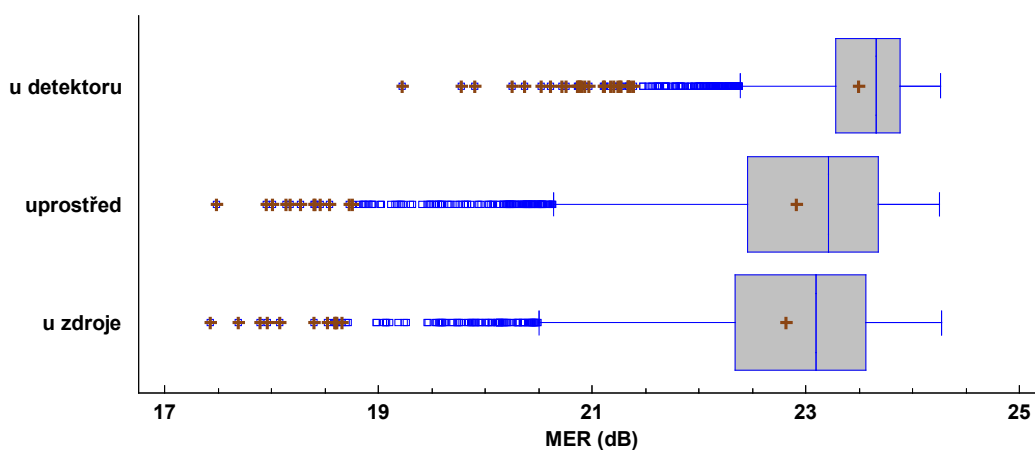
Z post-hoc analýzy je zřejmé, že statisticky významný rozdíl je mezi všemi skupinami. Pouze v jednom případě u modulace 64QAM vlnové délce 850 nm vyšla skupina umístění turbulentního zdroje uprostřed a zdroje jako statisticky nevýznamná.

Tabulka 8.21: *Statisticky významně lišící se skupiny (označeny červeně)*

	Umístění	Detektor-Zdroj	Detektor-Uprostřed	Uprostřed-Zdroj
4QAM	650 nm			
	850 nm			
16QAM	650 nm			
	850 nm			
32QAM	650 nm			
	850 nm			
64QAM	650 nm			
	850 nm			

Na obrázku níže je zachycen krabicový graf zobrazující rozložení hodnot pomocí krabicového grafu dle umístění zdroje turbulence pro modulaci 16QAM. Názorně lze vidět, že umístěním turbulentního zdroje blíže ke zdroji záření se zhoršuje modulační chybovost.

Krabicový graf parametru MER modulace 16QAM dle umístění zdroje turbulence, 850 nm

Obrázek 8.24: *Krabicový graf pro porovnání místa zdroje turbulence u modulace 16QAM*

Hypotéza

H_0 : Počet turbulentních zdrojů nemá vliv na výslednou hodnotu MER

H_A : $\neq H_0$

Použitý test: Kruskal-Wallis

Tabulka 8.22: *Tabulka p-hodnot Kruskal-Wallisova testu*

λ	p-hodnota			
	4QAM	16QAM	32QAM	64QAM
650 nm	0	0	0	0
850 nm	0	0	0	0

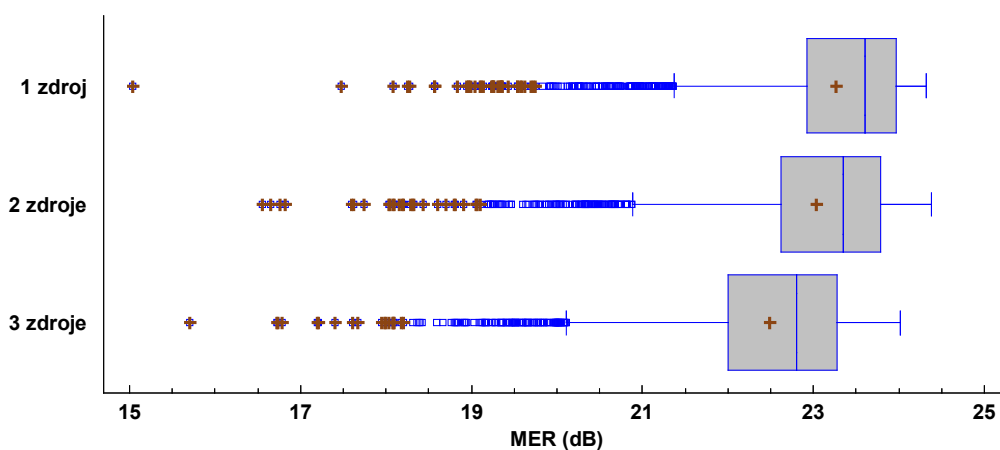
Rozhodnutí: Na základě p-hodnot v tabulce výše zamítáme nulovou hypotézu. Počet zdrojů má statisticky významný vliv na hladině spolehlivosti 95 %. Následuje provedení post-hoc analýzy.

Tabulka 8.23: *Statisticky významně lišící se skupiny (označeny červeně)*

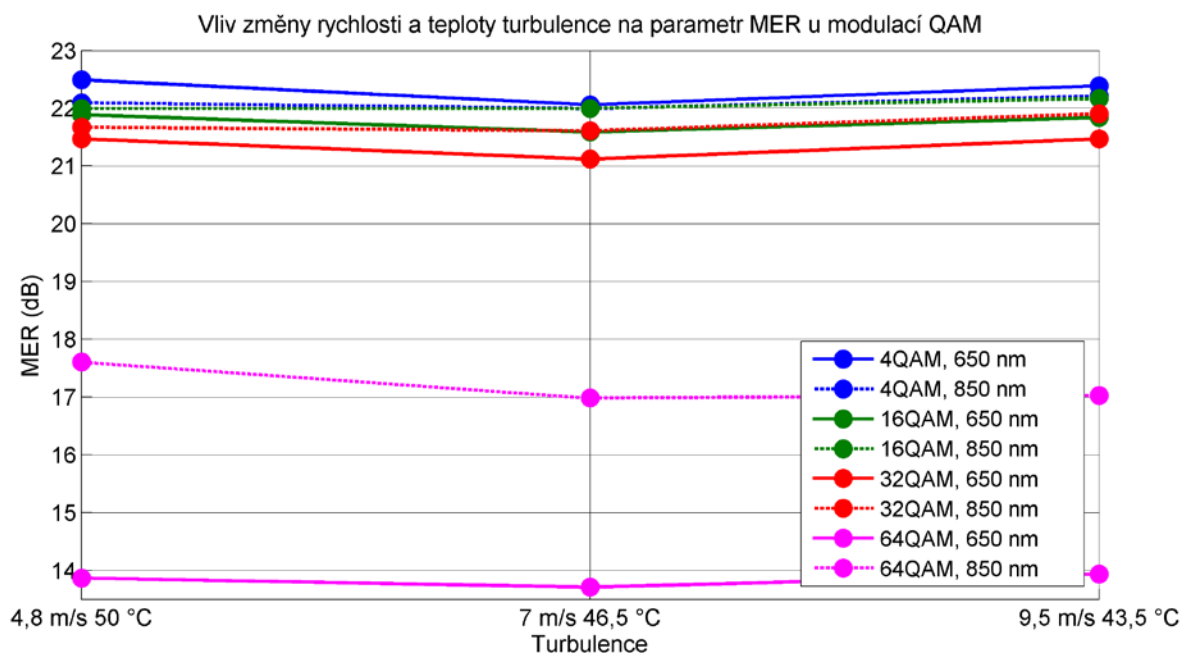
	Počet	1-2	1-3	2-3
4QAM	650 nm			
	850 nm			
16QAM	650 nm			
	850 nm			
32QAM	650 nm			
	850 nm			
64QAM	650 nm			
	850 nm			

Post-hoc analýza ukázala, že existují statisticky významné rozdíly v případě vyššího počtu turbulentních zdrojů, což také zachycují krabicové grafy dle počtu umístěných turbulencí do testovaného spoje. Lze vidět, že s větším počtem turbulentních zdrojů klesá parametr MER.

Krabicový graf modulace 4QAM dle počtu zdrojů turbulence, 650 nm

Obrázek 8.25: *Krabicový graf pro porovnání počtu zdrojů turbulence u modulace 4QAM*

Poslední hypotézou je vliv změny teploty a rychlosti turbulence. Z naměřených hodnot si lze všimnout, že ve většině případů dochází při snižování teploty a oproti tomu nárůstu rychlosti proudu turbulence k zlepšení parametru MER. Na následujícím grafu je zobrazen průběh pro šestý krok se třemi zdroji turbulence dle její teploty a rychlosti. U obou vlnových délek došlo při první změně turbulence k mírnému zhoršení parametru MER a při dalším poklesu teploty začala hodnota MER opět narůstat. Jestli jsou tyto rozdíly statisticky významné, určí následující hypotéza. Hypotéza je provedena pro první krok, kdy jsou rozdíly nejmenší, a pro šestý krok, kdy jsou rozdíly naopak největší. Pokud dojde k statisticky významným rozdílům v těchto krocích, dá se předpokládat stejné výsledky pro ostatní kroky.



Obrázek 8.26: Vliv parametru MER na teplotě a rychlosti turbulence pro modulace QAM

Hypotéza

H_0 : Změna teploty a rychlosti turbulence nemá vliv na výslednou hodnotu MER

H_A : $\neg H_0$

Použitý test: Kruskal-Wallis

Tabulka 8.24: Tabulka p-hodnot Kruskal-Wallisova testu

	p-hodnota							
	4QAM		16QAM		32QAM		64QAM	
krok	1	6	1	6	1	6	1	6
650 nm	0	0	0	0	0	0	0	0,16
850 nm	0	0	0	0	0	0	0	0

Rozhodnutí: Na základě p-hodnot zamítáme nulovou hypotézu vyjma situace u vlnové délky 650 nm, kde u modulace 64QAM v šestém kroku došlo k nezamítnutí nulové hypotézy. V ostatních případech je rozdíl statisticky významný na hladině spolehlivosti 95 %. Následuje post-hoc analýza (tabulka 8.25), které skupiny jsou statisticky významné (skupina 1 – 50 °C 4,8 m/s, skupina 2 – 46,5 °C 7 m/s a skupina 3 – 43,5 °C 9,5 m/s).

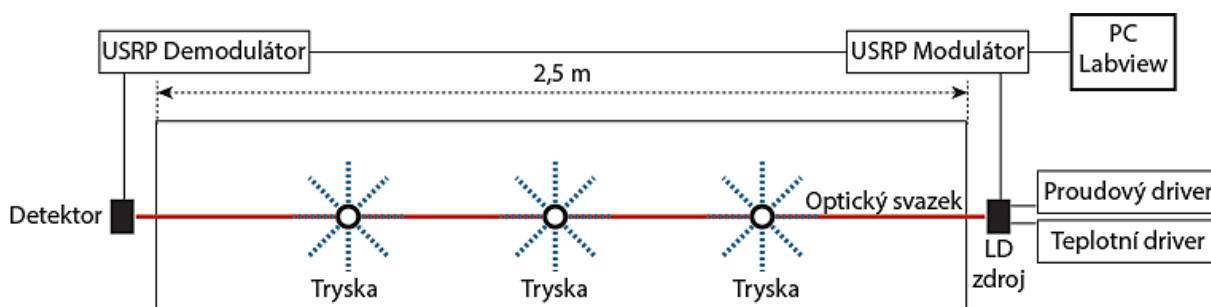
Z výsledné post-hoc analýzy je zřejmé, že ve většině případů je změna teploty i rychlosti turbulence statisticky významná. U vlnové délky 850 nm došlo k několika statisticky nevýznamným rozdílům. Jedná se především o první a třetí skupinu. To je dáno tím, že po druhé změně turbulence docházelo k zlepšování parametru MER (viz graf na obrázku 8.26) a hodnoty si jsou blízké s hodnotami turbulence při 35 % otáček ventilátorů.

Tabulka 8.25: *Statisticky významně lišící se skupiny (označeny červeně)*

	Turbulence	krok 1			krok 6		
		1 - 2	1 - 3	2 - 3	1 - 2	1 - 3	2 - 3
4QAM	650 nm						
	850 nm						
16QAM	650 nm						
	850 nm						
32QAM	650 nm						
	850 nm						
64QAM	650 nm				Nezamítnutá H_0		
	850 nm						

8.3 Simulace deště

Dalším atmosférickým jevem, který byl simulován, je vliv deště na modulovaný optický svazek. Ke tvorbě deště bylo použito zařízení popsané v kapitole 7. Schéma měření je na následujícím obrázku 8.27. Nad dráhou optického svazku byly umístěny tři trysky, které vytvářely dešťové kapky. Ty působily na samotný optický svazek a docházelo k jeho degradaci. Tak jako u předchozího měření, byla měřena každá modulace pět minut a následně byly vyhodnoceny. Byly použity tři druhy trysek. Pro každý typ trysek byly modulace změřeny se dvěma průtoky (100 % a 50 % otevření ventilu). Celkově tedy šest měřících kroků pro každou vlnovou délku.

Obrázek 8.27: *Schéma měření vlivu deště na modulační formát*

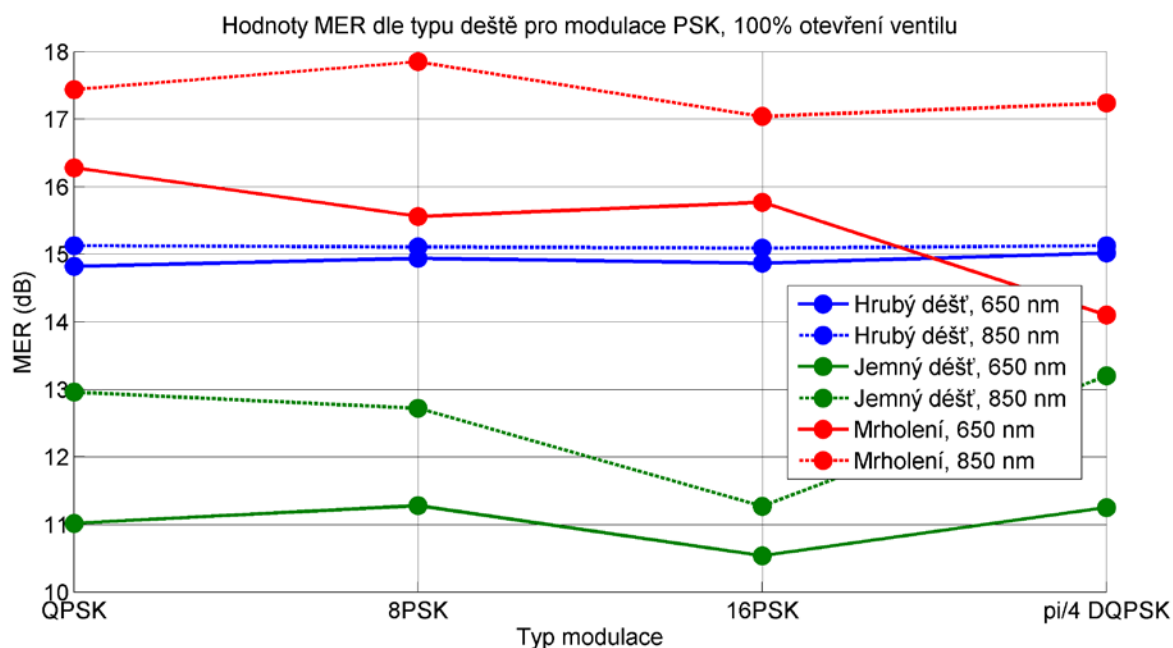
Protože však nebylo možné od výrobce zjistit velikost vytvářených kapek, byl déšť definován na základě pozorovatele na následující tři typy. Hrubý silný déšť (značně velká velikost kapek a velmi intenzivní déšť), jemný silný déšť (menší velikost kapek a velmi intenzivní déšť) a jako mrholení (malá velikost kapek a malá intenzita deště). Mrholení je definováno dle [43] při rozměru kapek menších než 0,5 mm, což odpovídá změřené trysce, která měla průměrné kapky o velikosti 460 μm . Obrázek 8.28 zachycuje jednotlivé typy deště.

Při 100 % otevřeném ventilu byly následující průtoky a tlaky na trysce, 8,3 l/min 0,7 bar pro hrubý déšť, 6,3 l/min 2,3 bar pro jemný déšť a 1,6 l/min 4,1 bar pro mrholení. U 50 % otevření ventilu byly následující průtoky a tlaky na trysce, 5,3 l/min 0,4 bar pro hrubý déšť, 3,6 l/min 1,8 bar pro jemný déšť a 1 l/min 3,7 bar pro mrholení.



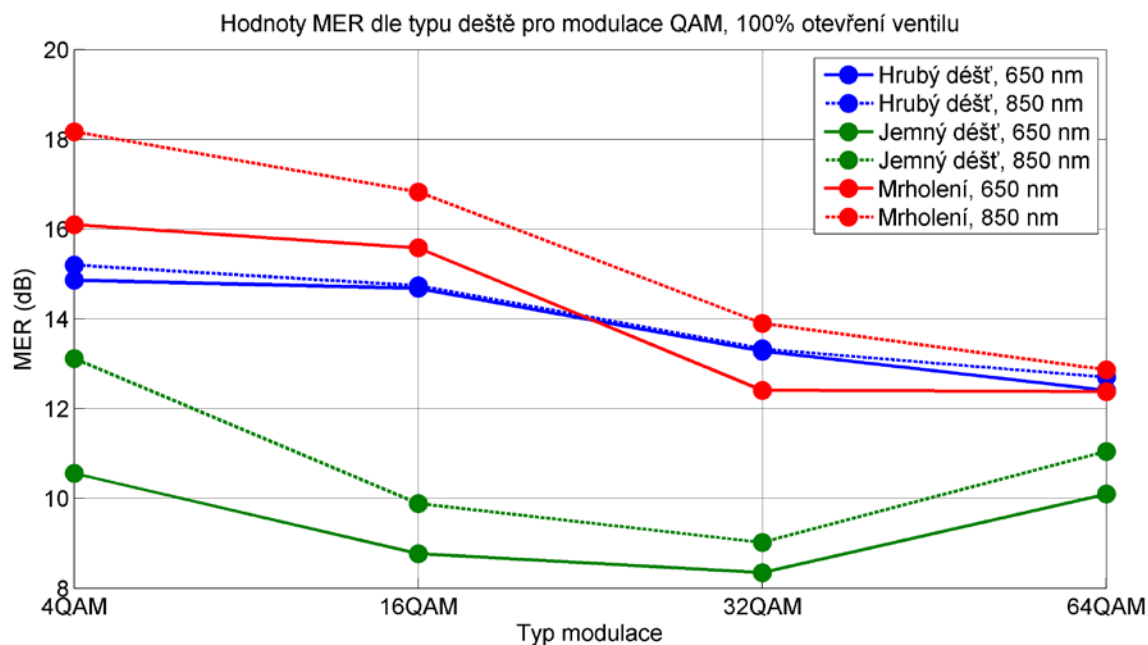
Obrázek 8.28: Typy deště definované zleva jako: hrubý déšť, jemný déšť a mrholení

Explorační analýza naměřených hodnot dle typu deště je uvedena v příloze B.4. Z tabulky explorační analýzy byly vytvořeny níže uvedené grafy pro vizuální srovnání. Následně byla z explorační analýzy sestavena tabulka průměrné hodnoty pro daný typ deště a z tohoto průměru byla vypočtena difference mezi referenčním prostředím a prostředím s deštěm (tabulka 8.26).



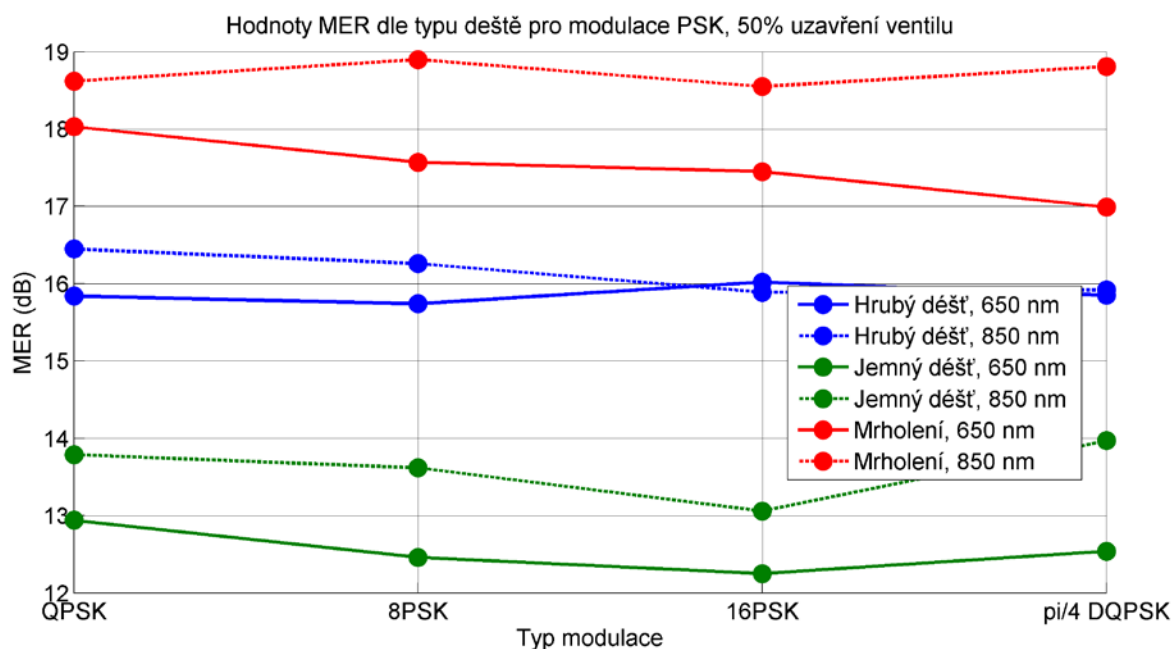
Obrázek 8.29: Graf průměrné hodnoty MER dle typu deště a modulace PSK, otevření ventilu 100 %

Na obrázku 8.29 je graf PSK modulací dle typu deště pro 100 % otevření ventilu. Ve srovnání vlnových délek vychází odolnější vlnová délka 850 nm. Je patrné, že nejhorší vliv na kvalitu modulace měl jemný typ deště, který byl velmi intenzivní. U tohoto deště se jevila jako nejodolnější modulace $\pi/4$ DQPSK. Za ní nezaostávali o moc modulace QPSK a 8PSK. Modulace 16PSK dosahovala nejhorších hodnot. Menší vliv měl hrubý intenzivní déšť, u kterého jsou hodnoty MER u všech modulací poměrně vyrovnané, a také zde není velký rozdíl mezi použitou vlnovou délkou. Nejmenší vliv měl déšť definovaný jako mrholení. Zde patřila mezi nejlepší modulace QPSK a 8PSK a mezi nejhorší $\pi/4$ DQPSK, která byla naopak nejodolnější u předchozích dvou typů deště.

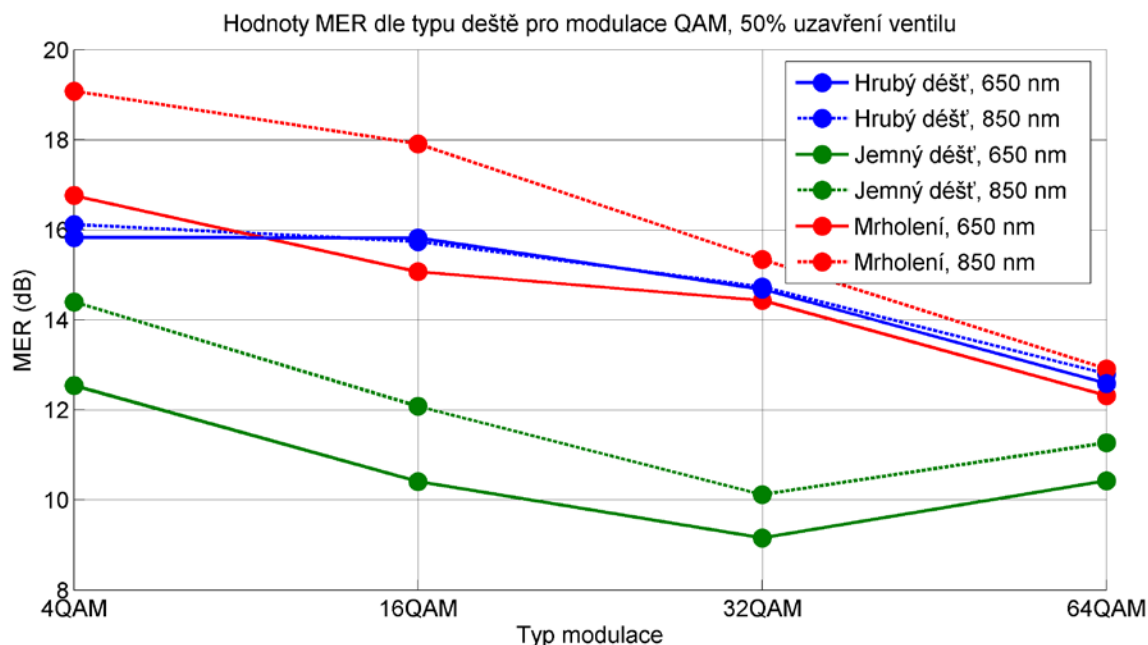


Obrázek 8.30: Graf průměrné hodnoty MER dle typu deště a modulace QAM, otevření ventilu 100 %

Na Obrázek 8.30: je graf QAM modulací dle typu deště pro 100 % otevření ventilu. Tak jako u PSK modulací i tady má vlnová délka 850 nm menší vliv oproti vlnové délce 650 nm. Také jemný typ deště byl u modulací QAM nejhorší. U tohoto deště se jevila jako nejodolnější modulace 4QAM. U vícecestavových QAM modulací již došlo poměrně většímu odstupu. Zajímavostí je, že modulace 64QAM u tohoto deště dosahovalo lepších hodnot než 16 a 32QAM. U dalších typů již patřila mezi nejhorší. U dalších typů deště již bylo pořadí následovné. Jako nejodolnější dle očekávání 4QAM a dále dle počtu stavů modulace od nejmenšího po největší počet stavů.



Obrázek 8.31: Graf průměrné hodnoty MER dle typu deště a modulace PSK, uzavření ventilu 50 %



Obrázek 8.32: Graf průměrné hodnoty MER dle typu deště a modulace QAM, uzavření ventilu 50 %

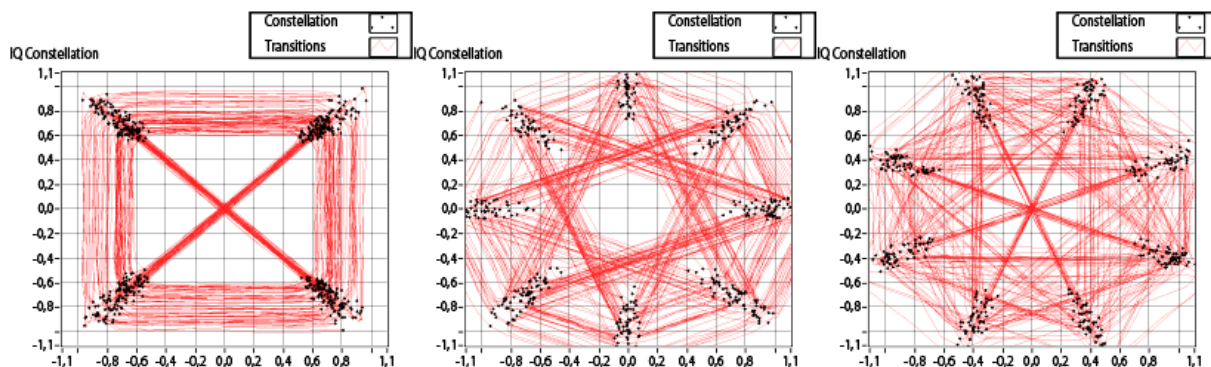
Na obrázcích 8.31 a 8.32 jsou grafy pro uzavření ventilu na 50 %. Vlivem zmenšení průtoku došlo k menšímu ovlivnění optického svazku a zákonitě tak došlo ke zlepšení parametru modulační chybovosti. Pořadí a chování modulací dle daného deště jsou srovnatelné s výsledky, kdy byl škrtící ventil otevřený na 100 %.

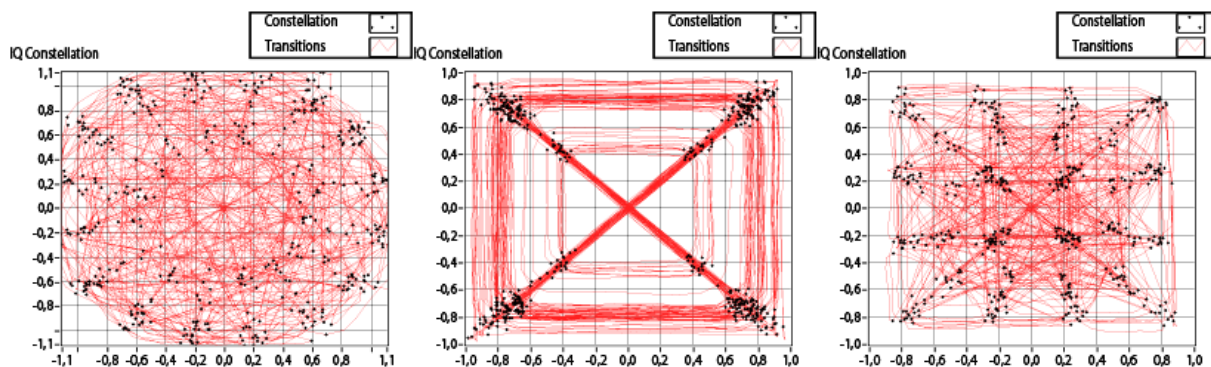
V níže uvedené tabulce jsou již zmíněné průměrné hodnoty dle typu deště s následným výpočtem difference oproti referenčnímu prostředí bez atmosférických vlivů. Dále je ze všech tří typů deště vypočten průměr pro názorné zhodnocení, která modulace dosahuje při dešti největší odolnosti. Z pohledu difference mezi referenčním prostředím a hrubým deštěm má nejmenší ovlivnění modulace u vlnové délky 650 nm modulace 16QAM a u vlnové délky 850 nm QPSK. U jemného deště v případě 650 nm QPSK a u 850 nm 4QAM. U mrholení jsou výsledky stejné jako u jemného deště. Prokazatelně jsou tak odolnější modulační typy s menším počtem stavů, u kterých je menší riziko záměny symbolu. Mezi naopak nejhorší modulační typy dle ovlivnění jsou podle očekávání 32QAM a 64QAM. Při zprůměrování výsledných hodnot parametru MER ze všech tří typů deště vychází jako nejlepší u vlnové délky 650 nm QPSK. Dále překvapivě 8PSK, 16PSK a až za nimi modulační typy 4QAM a $\pi/4$ DQPSK. Zbylé QAM modulační typy se řadí dle počtu stavů od nejmenšího po největší. Dle těchto výsledků jsou prokazatelně odolnější modulační typy PSK oproti QAM. Při použití vlnové délky 850 nm vyšla jako nejlepší modulační typ 4QAM. Za ní následují 8PSK, QPSK a $\pi/4$ DQPSK. Rozdíl těchto tří modulací dosahuje pouze tří setin. Za nimi je modulační typ 16PSK a dále opět jako u vlnové délky 650 nm zbylé vícecestavové QAM modulační typy.

Tabulka 8.26: Průměrné hodnoty MER (dB) dle typu deště a difference mezi referenčním prostředím

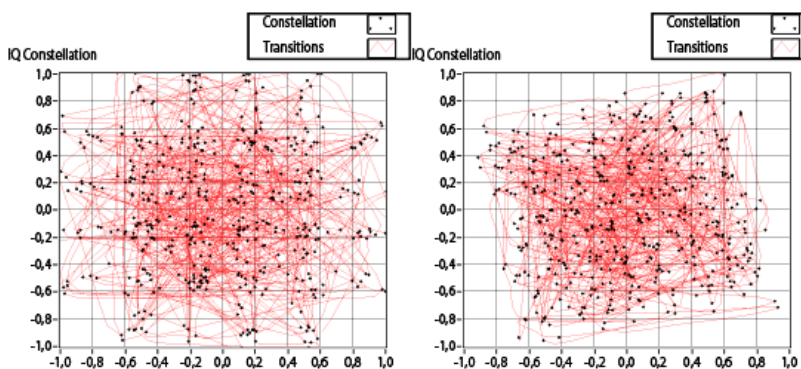
Typ deště		MER (dB)						
		Hrubý dešť		Jemný dešť		Mrholení		Celkový průměr
		Průměr	Diference	Průměr	Diference	Průměr	Diference	
QPSK	650 nm	15,33	8,94	11,98	12,29	17,16	7,12	14,82
	850 nm	15,79	8,23	13,38	10,65	18,03	5,99	15,73
$\pi/4$ DQPSK	650 nm	15,45	8,90	11,90	12,44	15,55	8,79	14,29
	850 nm	15,53	8,66	13,59	10,60	18,03	6,16	15,71
8PSK	650 nm	15,34	8,95	11,87	12,42	16,57	7,73	14,59
	850 nm	15,69	8,46	13,17	10,97	18,38	5,77	15,74
16PSK	650 nm	15,45	8,85	11,40	12,90	16,61	7,68	14,48
	850 nm	15,49	8,69	12,17	12,02	17,80	6,39	15,15
4QAM	650 nm	15,35	8,95	11,55	12,74	16,43	7,86	14,44
	850 nm	15,66	8,47	13,76	10,37	18,63	5,51	16,02
16QAM	650 nm	15,25	8,28	9,59	13,94	15,33	8,21	13,39
	850 nm	15,24	8,70	10,99	12,96	17,37	6,57	14,53
32QAM	650 nm	13,98	9,30	8,76	14,53	13,42	9,86	12,05
	850 nm	14,03	10,04	9,57	14,50	14,62	9,45	12,74
64QAM	650 nm	12,50	10,69	10,27	12,93	12,35	10,84	11,71
	850 nm	12,75	9,18	11,16	10,77	12,89	9,04	12,27

Nyní budou uvedeny zachycené konstelační diagramy pro typ deště definovaného jako hrubý, který ze všech tří typů ovlivnil parametr MER na úrovni mezi jemným deštěm a mrholením. Zachycené diagramy jsou podobné pro všechny tři typy. Protože se však v krátkých časových okamžicích měnily, záleželo tak na daném časovém okamžiku zachycení. Ve srovnání s vlivem turbulencí je vidět, že jednotlivé symboly jsou rozprostřenější, což značí nižší hodnotu MER.

Obrázek 8.33: Konstelační diagram zleva: QPSK, $\pi/4$ DQPSK, 8PSK



Obrázek 8.34: Konstelační diagram zleva: 16PSK, 4QAM, 16QAM



Obrázek 8.35: Konstelační diagram zleva: 32QAM, 64QAM

8.3.1 Testování hypotéz

V této podkapitole budou testovány hypotézy, jestli je statisticky významný rozdíl hodnot MER dle typu tvořeného deště a vlivu množství průtoku (množství srážek).

8.3.1.1 PSK modulace

Normalita dat

H_0 : Data pochází z normálního rozdělení

H_A : $\neg H_0$

Použitý test: Kolmogorov-Smirnov test

Tabulka 8.27: *P-hodnoty testu normality dat (šedě označené hodnoty, u kterých nezamítáme H_0)*

Typ deště		Hrubý		Jemný		Mrholení	
Otevření ventilu		100%	50%	100%	50%	100%	50%
QPSK	650 nm	0	0	0,004	0,009	0,15	0
	850 nm	0,004	0	0,04	0,49	0,007	0,29
$\pi/4$ DQPSK	650 nm	0	0	0,18	0,012	0,15	0,004
	850 nm	0	0	0	0,47	0,03	0,17
8PSK	650 nm	0	0	0,19	0,03	0,27	0,001
	850 nm	0	0	0	0,01	0	0,27
16PSK	650 nm	0	0	0	0,39	0,88	0
	850 nm	0,002	0	0	0,14	0	0,35

Rozhodnutí: Na základě p-hodnot dochází u většiny dat k zamítnutí nulové hypotézy. Data nepochází z normálního rozdělení. Data, u kterých nebyla zamítnuta nulová hypotéza, jsou označeny šedou barvou. Protože však budou v testování hypotéz srovnávány typy deště a data dle otevření ventilu, není možné u žádného případu použít test ANOVA (celá skupina dat v řádku by musela pocházet z normálního rozdělení).

Hypotéza

H_0 : Typ deště nemá vliv na výslednou hodnotu MER

H_A : $\neg H_0$

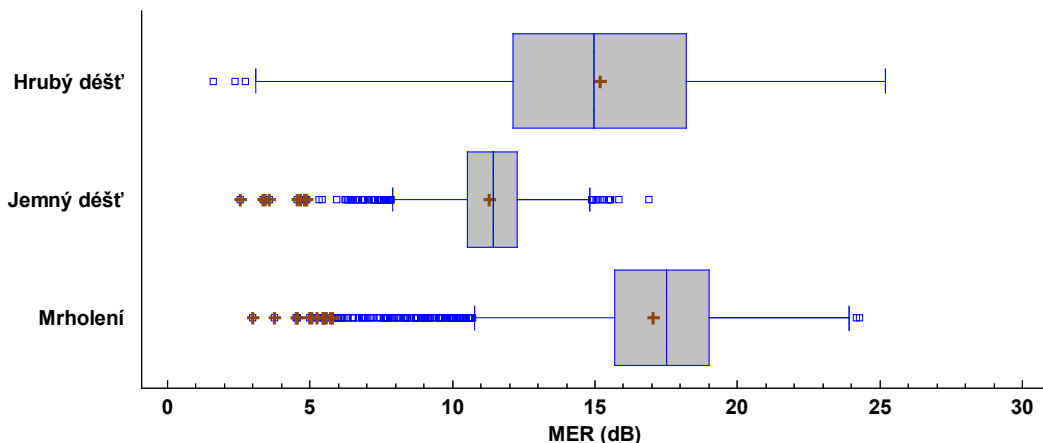
Použitý test: Kruskal-Wallis

Tabulka 8.28: *Tabulka p-hodnot Kruskal-Wallisova testu*

	p-hodnota							
	QPSK		$\pi/4$ DQPSK		8PSK		16PSK	
Otevření ventilu	100 %	50 %	100%	50 %	100 %	50 %	100 %	50 %
650 nm	0	0	0	0	0	0	0	0
850 nm	0	0	0	0	0	0	0	0

Rozhodnutí: Na základě p-hodnot v tabulce výše ve všech případech zamítáme nulovou hypotézu. Mezi hodnotami je statisticky významný vliv na hladině spolehlivosti 95 % a můžeme tak tvrdit, že typ deště má vliv na výslednou hodnotu MER. Statisticky významné jsou všechny skupiny.

Krabicový graf parametru MER modulační 16PSK dle typu deště, otevření ventilu 100 %



Obrázek 8.36: *Krabicový graf parametru MER modulační 16PSK dle typu deště*

Na obrázku 8.36 je zobrazen krabicový graf modulační 16PSK dle typu generovaného deště. Je zřejmé, že jednotlivé mediány se neshodují, a tak je zamítnutí nulové hypotézy opodstatněné.

Hypotéza

H_0 : Množství průtoku vody (počet srážek) nemá vliv na výslednou hodnotu MER

H_A : $\neg H_0$

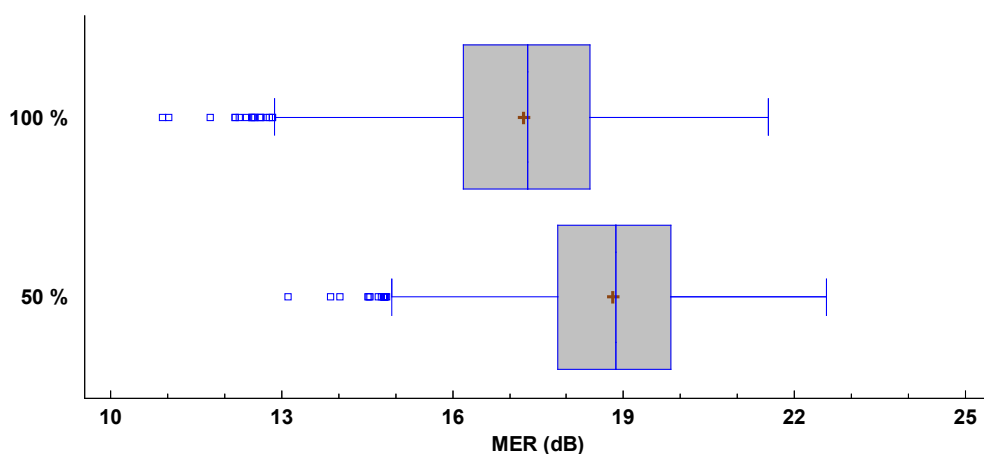
Použitý test: Mann-Whitney

Tabulka 8.29: Tabulka p-hodnot Mann-Whitney testu

	p-hodnota											
	QPSK			$\pi/4$ DQPSK			8PSK			16PSK		
Typ deště	H	J	M	H	J	M	H	J	M	H	J	M
650 nm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
850 nm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Rozhodnutí: Na základě p-hodnot zamítáme nulovou hypotézu ve všech případech. Vliv množství srážek má statisticky významný vliv.

Krabicový graf parametru MER pro modulaci $\pi/4$ DQPSK dle otevření ventilu typ deště mrholení, 850 nm

Obrázek 8.37: Krabicový graf parametru MER modulace $\pi/4$ DQPSK dle otevření ventilu

8.3.1.2 QAM modulace

Nejprve bude tak jako u PSK modulací otestována normalita dat.

Normalita dat

H_0 : Data pochází z normálního rozdělení

H_A : $\neg H_0$

Použitý test: Kolmogorov-Smirnov test

Tabulka 8.30: P-hodnoty testu normality dat (šedě označené hodnoty, u kterých nezamítáme H_0)

Typ deště		Hrubý		Jemný		Mrholení	
Otevření ventilu		100%	50%	100%	50%	100%	50%
4QAM	650 nm	0	0	0,10	0,10	0,22	0,001
	850 nm	0,02	0	0,36	0,58	0,007	0,16
16QAM	650 nm	0	0	0	0	0	0
	850 nm	0	0	0	0	0	0
32QAM	650 nm	0	0	0	0	0	0
	850 nm	0	0	0	0	0	0
64QAM	650 nm	0	0	0	0	0	0
	850 nm	0	0	0	0	0	0

Rozhodnutí: Na základě p-hodnot dochází u většiny dat k zamítnutí nulové hypotézy. Data nepochází z normálního rozdělení na hladině spolehlivosti 95 %. Data, u kterých nebyla zamítnuta nulová hypotéza, jsou označeny šedou barvou. U modulace 4QAM bude možno použít v případě hypotézy o vlivu množství srážek při jemném typu deště t-test, protože nebyla zamítnuta nulová hypotéza, že data pochází z normálního rozdělení. V ostatních případech bude použit neparametrický test.

Hypotéza

H_0 : Typ deště nemá vliv na výslednou hodnotu MER

H_A : $\neq H_0$

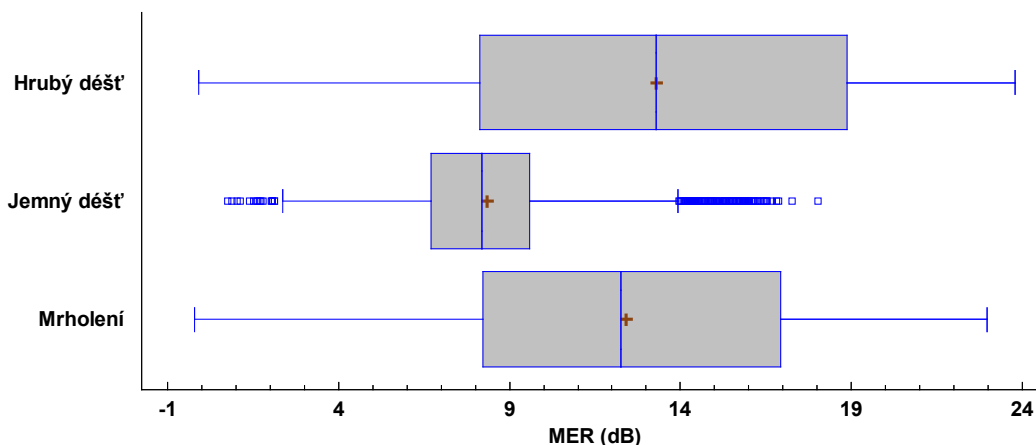
Použitý test: Kruskal-Wallis

Tabulka 8.31: *Tabulka p-hodnot Kruskal-Wallisova testu*

	p-hodnota							
	4QAM		16QAM		32QAM		64QAM	
Otevření ventilu	100 %	50 %	100%	50 %	100 %	50 %	100 %	50 %
650 nm	0	0	0	0	0	0	0	0
850 nm	0	0	0	0	0	0	0	0

Rozhodnutí: Na základě p-hodnot v tabulce výše ve všech případech zamítáme nulovou hypotézu. Typ deště má statisticky významný vliv na hladině spolehlivosti 95 %. Statisticky významné jsou všechny skupiny. Na následujícím obrázku je krabicový graf pro modulaci 32QAM. Opět jde vidět, že mediány nejsou shodné, a proto je zamítnuta nulová hypotéza. Tak jako u PSK je u hrubého deště největší rozptyl dat a u jemného deště nejmenší avšak u jemného deště se dosahuje nejmenších hodnot parametru MER.

Krabicový graf parametru MER pro modulaci 32QAM dle typu deště, otevření ventilu 100 %



Obrázek 8.38: *Krabicový graf parametru MER modulace 32QAM dle typu deště*

Hypotéza

H_0 : Množství průtoku vody (počet srážek) nemá vliv na výslednou hodnotu MER

H_A : $\neq H_0$

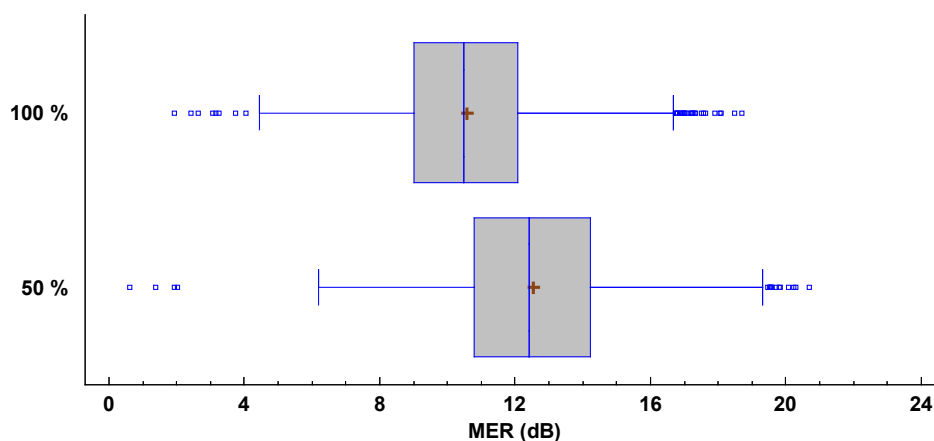
Použitý test: Mann-Whitney a pro 4QAM u jemného deště t-test

Tabulka 8.32: Tabulka p-hodnot Mann-Whitney testu

	p-hodnota											
	4QAM			16QAM			32QAM			64QAM		
Typ deště	H	J	M	H	J	M	H	J	M	H	J	M
650 nm	0	0	0	0	0	0,02	0	0	0	0,17	0,001	0,52
850 nm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,007	0,21	0

Rozhodnutí: Na základě p-hodnot zamítáme nulovou hypotézu, kromě tří situací u modulace 64QAM, viz tabulka p-hodnot (nezamítnuté H_0 označeny šedě). Vliv množství srážek má statisticky významný vliv.

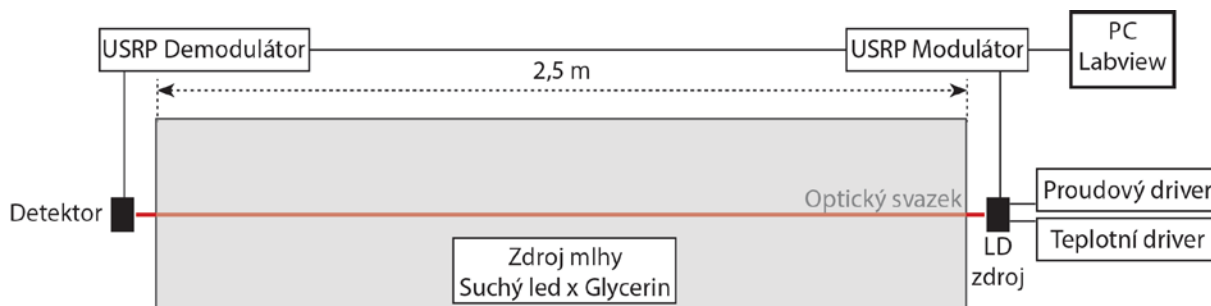
Krabicový graf parametru MER pro modulaci 4QAM dle otevření ventilu pro jemný déšť, 650 nm



Obrázek 8.39: Krabicový graf parametru MER modulace 4QAM dle otevření ventilu

8.4 Mlha

Posledním simulovaným atmosférickým jevem byla mlha. Byly použity dva způsoby tvorby mlhy, a to pomocí glycerinového generátoru mlhy Antari F-80Z a suchého ledu. Vzniklé mlhy mají svá specifika, díky kterým bylo měření přizpůsobeno. Největším specifikem byl čas, po který se daná mlha rozpadala. Vzniklá mlha pomocí sublimace suchého ledu se rozpadá daleko rychleji než mlha z mlhovače. Ta vydrží v boxu velmi dlouhou dobu a také závisí na množství, které do boxu pustíme. Paralelně byla měřena diplomová práce zabývající se měřením velikosti částic mlhy, a tak bylo možné kvantifikovat dávku vpuštěné mlhy (z glycerinového mlhovače) do laboratorního boxu. Mlhu vzniklou pomocí sublimace suchého ledu však možno kvantifikovat nebylo, protože přístroje na měření částic nebyly k tomuto měření použitelné. Schéma měření vlivu mlhy je na obrázku 8.40.



Obrázek 8.40: Schéma měření vlivu mlhy na modulační formáty

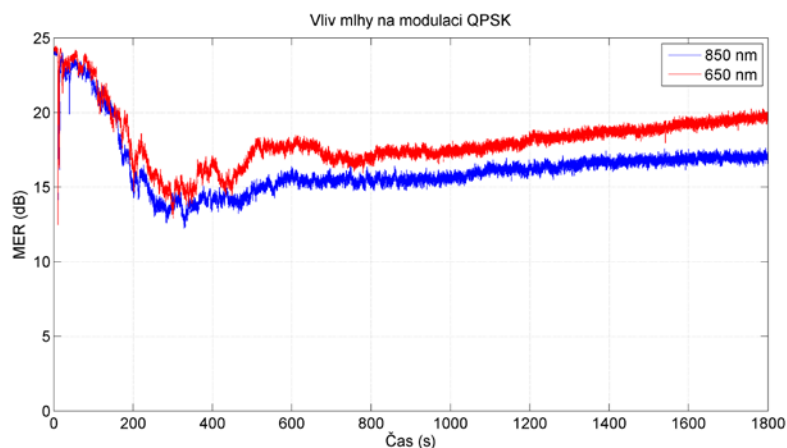
8.4.1 Glycerinová mlha z mlhovače

Protože mlha z mlhovače je dost intenzivní a velmi pomalu se rozpadá, byla do boxu vpouštěna dávka mlhy po dobu tří sekund. Následně byla každá modulace měřena po dobu třiceti minut, aby bylo zřejmé, jak se s časem mlha rozpadá a dochází tak ke zlepšování parametru MER. Proces generace mlhy je zobrazen na obrázku 8.41. Vlevo je čistý box před vstříknutím dávky mlhy, vprostřed zachycuje situaci, kdy je dávka mlhy vstříknuta do laboratorního boxu. Po určitý čas se mlha drží u na horní stěně boxu a poté se začíná pomalu rozptylovat po celém objemu boxu. Rozprostřenou mlhu lze vidět na obrázku vpravo. I po třiceti minutách není mlha zcela rozpadlá, což bude vidět v průbězích parametru MER a také z kvantifikace částic mlhy.

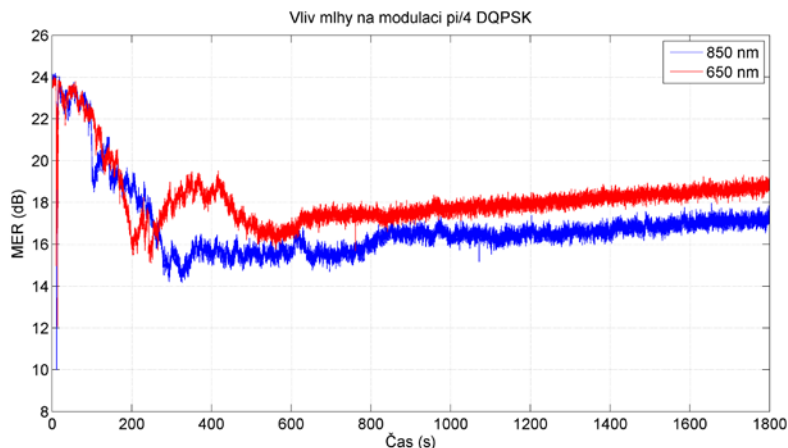


Obrázek 8.41: Proces generace mlhy

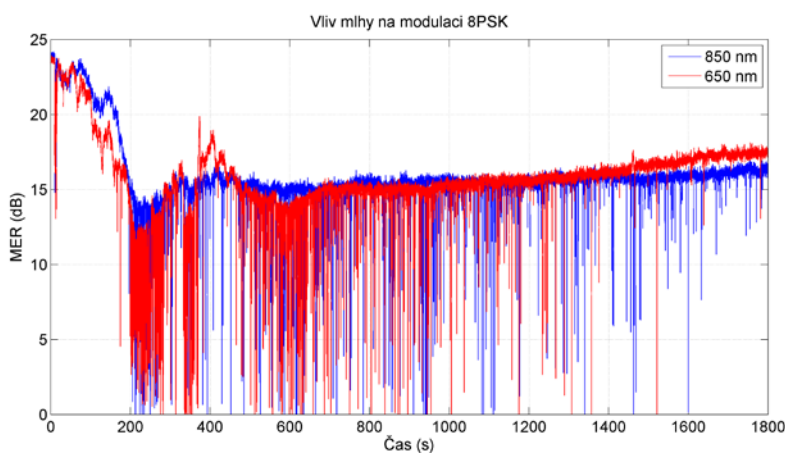
8.4.1.1 PSK modulace



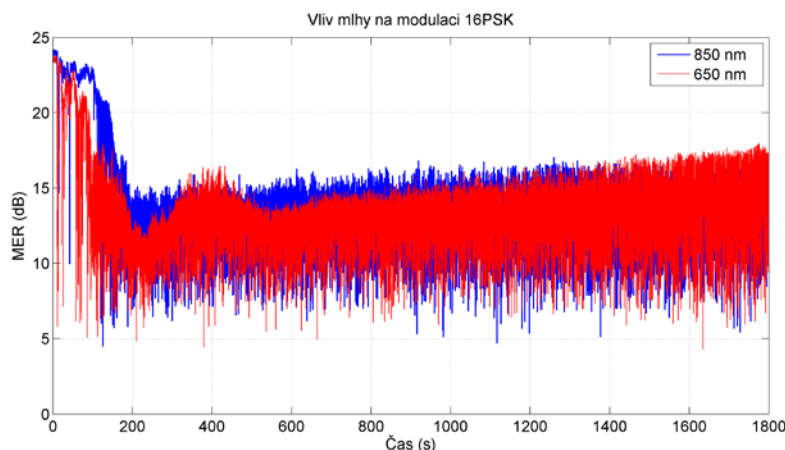
Obrázek 8.42: Časový průběh parametru MER při působení mlhy na modulaci QPSK



Obrázek 8.43: Časový průběh parametru MER při působení mlhy na modulaci $\pi/4$ DQPSK



Obrázek 8.44: Časový průběh parametru MER při působení mlhy na modulaci 8PSK

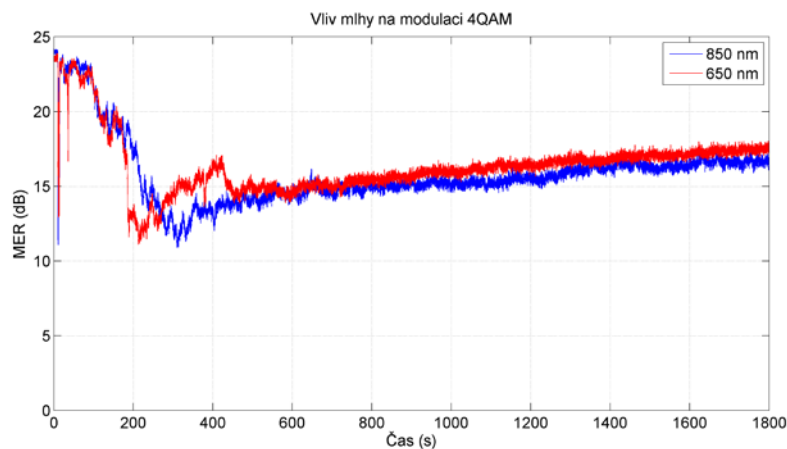


Obrázek 8.45: Časový průběh parametru MER při působení mlhy na modulaci 16PSK

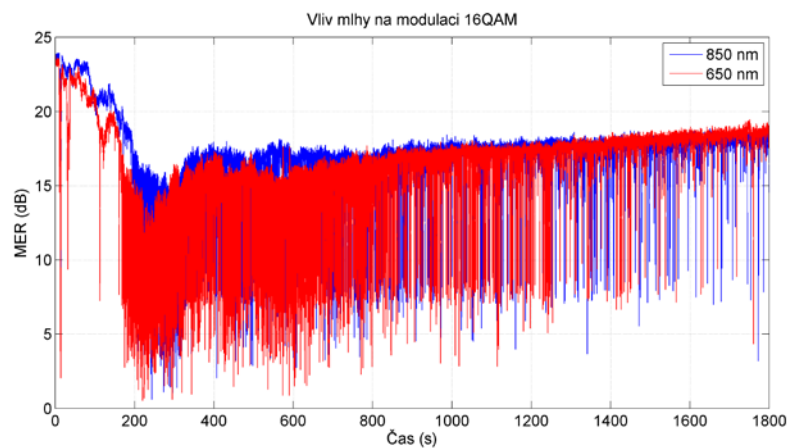
Na výše uvedených grafech jsou časové průběhy parametru MER pro dané PSK modulace při ovlivnění mlhou. Z grafů je patrné, že modulace s menším počtem stavů jsou odolnější na atmosférické vlivy. Při pohledu na časové průběhy QPSK a $\pi/4$ DQPSK ve srovnání s 8PSK a 16PSK je patrné, že hodnota MER u složitějších modulací poměrně hodně osciluje, kdežto jednodušší modulace oscilují nepatrně. Také z pohledu nejnižší dosažené hodnoty MER po rozptýlení mlhy jsou na tom lépe QPSK a $\pi/4$ DQPSK. Z grafů je patrné, že po vstříknutí mlhy docházelo k postupnému

poklesu do doby, než se mlha rozptýlila po celém boxu. Následně v čase okolo 200 až 300 sekund dochází k pomalému růstu hodnoty MER, avšak i po půlhodině nedosahují původních hodnot.

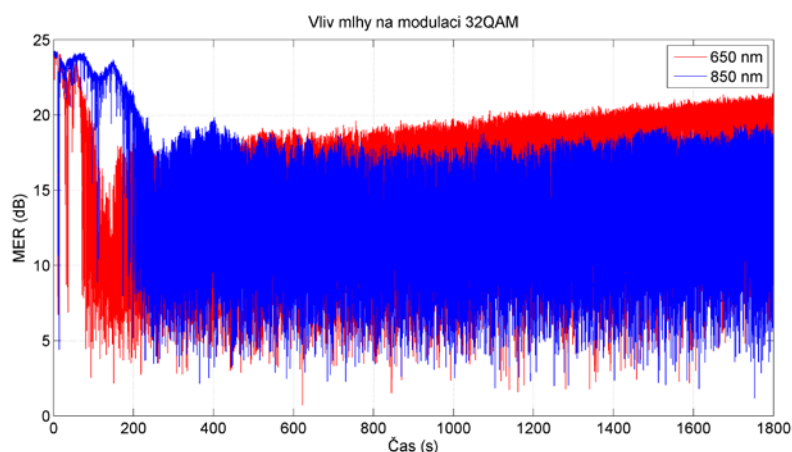
8.4.1.2 QAM modulace



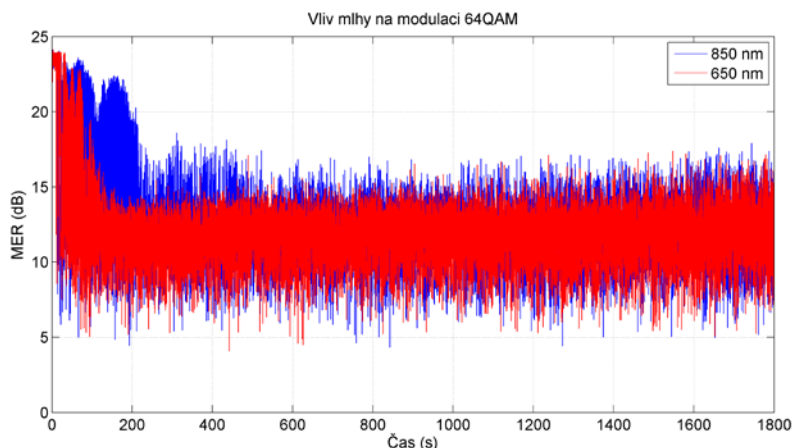
Obrázek 8.46: Časový průběh parametru MER při působení mlhy na modulaci 4QAM



Obrázek 8.47: Časový průběh parametru MER při působení mlhy na modulaci 16QAM



Obrázek 8.48: Časový průběh parametru MER při působení mlhy na modulaci 32QAM

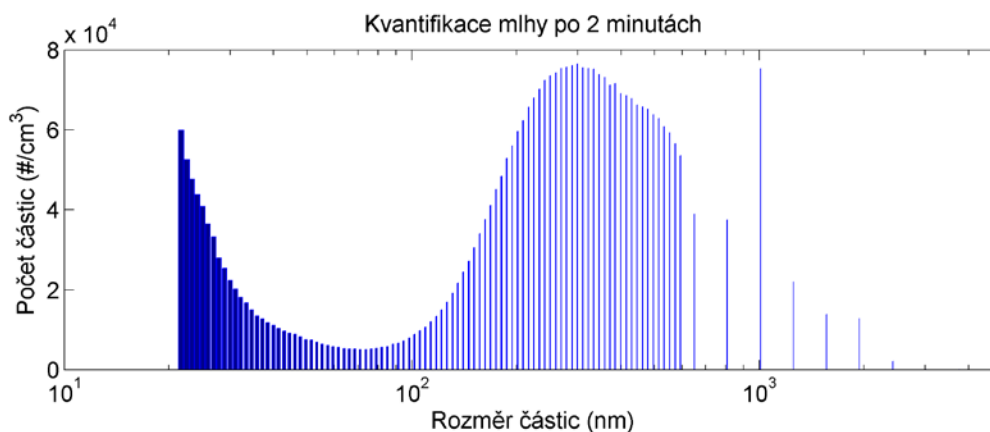


Obrázek 8.49: Časový průběh parametru MER při působení mlhy na modulaci 64QAM

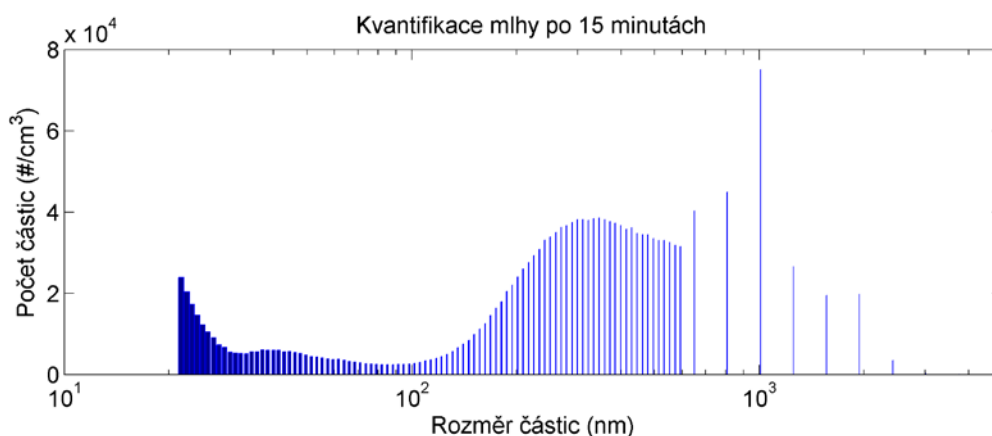
Tak jako u modulací PSK i zde dochází ke stejnému chování, kdy modulace s malým počtem stavů po dosažení nejnižší úrovně pomalu roste bez větších oscilací parametru MER. U složitějších modulací (16QAM a výše) dochází během celého půlhodinového intervalu k velké oscilaci hodnot. Je patrné, že se hodnoty pomalu zlepšují, ale hodnoty jsou oproti 4QAM velice proměnlivé. Zajímavostí je, že modulace 32QAM byla více nestabilní než modulace 64QAM, u které by se dalo čekat, že bude dosahovat horších výsledků. Také zde dochází po uplynutí zhruba 200 sekund k dosažení minima a následnému růstu hodnoty MER při postupném rozpadu mlhy.

8.4.1.3 Kvantifikace mlhy

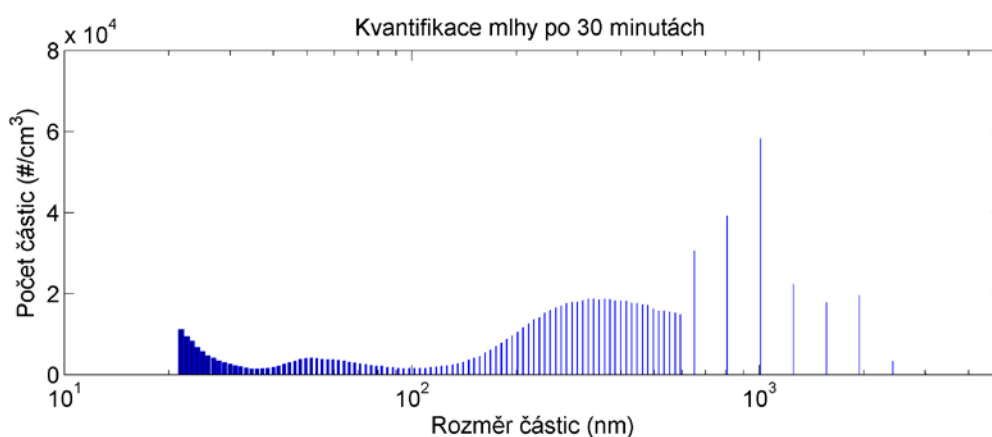
Vzhledem k tomu, že paralelně probíhala diplomová práce Bc. Vít Slovácčka na měření rozměrů částic mlhy, byla za pomoci přístrojů SMPS 3080, CPC3772 a OPS 3330 změřena třísekundová dávka mlhy, která byla použita pro výše zmíněné měření vlivu mlhy na modulační formáty. Byl změřen počet částic dle jejich rozměrů. V následujících grafech jsou zahrnuty počty částic dle jejich rozměrů pro čas po dvou minutách, kdy u většiny modulací se dosáhlo minima, dále v půlce měřicího intervalu (15 minut) a poslední na konci měřeného intervalu (30 minut). Z grafů je patrné, že nejvíce se během měřené půlhodiny rozpadly nejmenší částice do 100 nm. U větších částic zhruba do 1000 nm došlo také k výraznému poklesu, avšak u částic o velikosti 1000 nm je stále i po půlhodině největší koncentrace. Tyto částice jsou srovnatelné s použitými vlnovými délkami a proto i po půlhodině dochází k značnému poklesu hodnoty MER.



Obrázek 8.50: Kvantifikace částic mlhy po 2 minutách



Obrázek 8.51: Kvantifikace částic mlhy po 15 minutách



Obrázek 8.52: Kvantifikace částic mlhy po 30 minutách

8.4.2 Mlha vzniklá sublimací suchého ledu

Jako druhá možnost generace mlhy bylo využití suchého ledu, jehož výhoda je to, že nedochází k procesu tání, ale mění své skupenství z pevného na plynné přímo. Tento proces se nazývá sublimace. Postup u měření byl následovný. Měrkou bylo nabráno do nádoby vždy stejné množství suchého ledu (150 ml), následně se suchý led zalil půllitrem vroucí vody a nastal proces sublimace. Protože vzniklá mlha je studená, drží se na dně boxu. Proto po sublimaci se pomocí ventilátoru mlha rozfoukala po celém boxu a bylo spuštěno měření. Protože vzniklá mlha zapříčiní nulovou viditelnost, dochází u modulací k poklesu úrovně parametru MER na nulu. Následným rozpadem mlhy začíná MER narůstat a u jednotlivých modulací byla určována doba, za kterou došlo k nárůstu na původní maximální hodnotu. Proces generace mlhy je zachycen na obrázku 8.53. Vlevo je vysublimovaná mlha, která se drží na dně boxu. Na snímku uprostřed je proces rozfoukání mlhy a na snímku vpravo je již mlha rozfoukána.

Suchý led je pevná forma oxidu uhličitého (CO_2). Vyrábí se ve formě pelet, nuget, plátků či velkých bloků. Pro toto měření byl zakoupen suchý led v peletách (granule). Výroba suchého ledu vzniká expanzí oxidu uhličitého, ze kterého vzniká jemný prášek – sníh CO_2 . Tento sníh je protlačován speciální matricí, dochází k jeho slisování, zhuštění a tvorbě suchého ledu v dané formě.

Suchý led má teplotu $-78,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, je bez zápachu a chuti, nejedovatý a nedýchatelný (ztráta vědomí nastává při $> 8\%$ koncentraci v objemu vzduchu).[45]

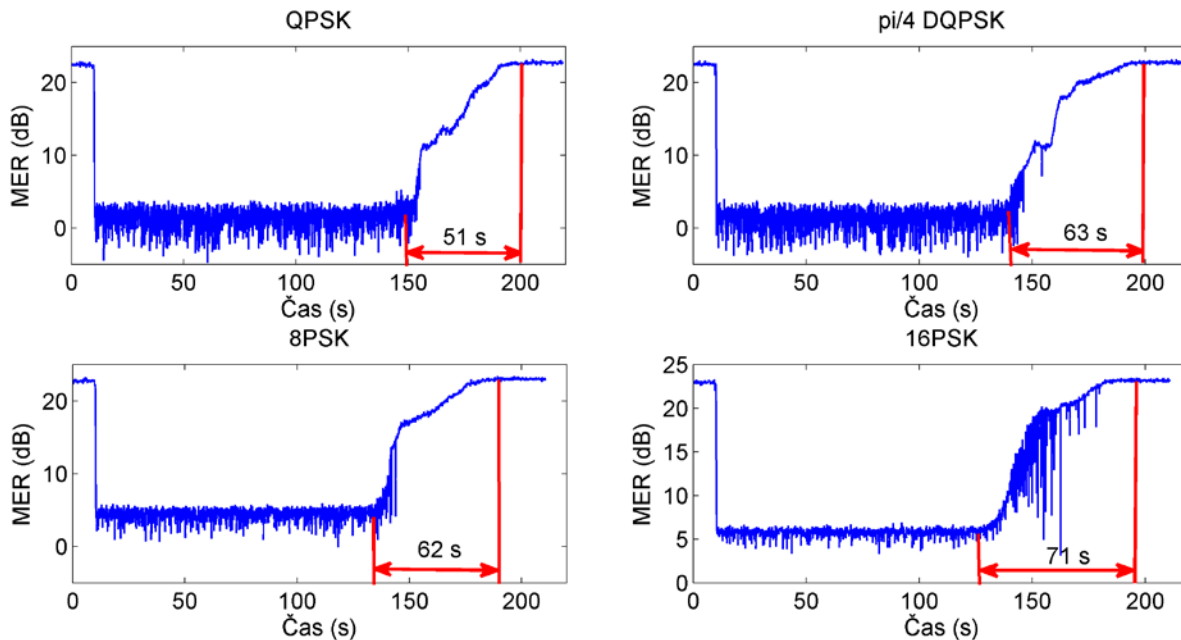


Obrázek 8.53: *Proces generace mlhy sublimací suchého ledu*

Jak již bylo zmíněno, byly zaznamenávány časové průběhy parametru MER při rozpadu mlhy. Z průběhů byla zjišťována doba, za kterou se hodnota MER vrátí na původní hodnotu. Každá modulace byla změřena třikrát. Z výsledných časů bylo provedeno testování statistických hypotéz, jestli je mezi časy statisticky významný rozdíl.

8.4.2.1 PSK modulace

U PSK modulací byly zjištěny časy, které jsou v tabulce 8.33. Na obrázku níže je zobrazeno, jak vypadá časový průběh u jednotlivých modulací. Je patrné, že jednotlivé průběhy jsou podobné. Pouze u modulace 16PSK docházelo při nárůstu hodnot k oscilacím.



Obrázek 8.54: *Časové průběhy PSK modulací při působení mlhy vzniklé sublimací suchého ledu*

Tabulka 8.33: *Hodnoty časů, za kterých dané PSK modulace dosáhly původní hodnoty*

Číslo měření		Čas (s)			
		QPSK	$\pi/4$ DQPSK	8PSK	16PSK
1	650 nm	42	45	78	43
	850 nm	74	71	80	81
2	650 nm	51	46	63	65
	850 nm	72	66	75	89
3	650 nm	46	50	45	57
	850 nm	51	63	62	71

Pro testování hypotéz je nejprve zjistit, jestli lze data považovat za data z normálního rozdělení. Dle výsledné hodnoty bude vybrán test ANOVA nebo Kruskal-Wallis.

Normalita dat

H_0 : Data pochází z normálního rozdělení

H_A : $\neq H_0$

Použitý test: Shapiro-Wilkův test

Tabulka 8.34: *Tabulka p-hodnot testování normality*

λ	p-hodnota			
	QPSK	$\pi/4$ DQPSK	8PSK	16PSK
650 nm	0,89	0,36	0,90	0,70
850 nm	0,16	0,73	0,52	0,88

Rozhodnutí: Na základě p-hodnot (všechny p-hodnoty $> 0,05$) nezamítáme u žádného případu nulovou hypotézu. Na hladině spolehlivosti 95% můžeme data pokládat za data z normálního rozdělení a může být použit test ANOVA.

Hypotéza

H_0 : Časy pro dosažení původní hodnoty MER jednotlivých modulací jsou statisticky nevýznamné

H_A : $\neq H_0$

Použitý test: ANOVA

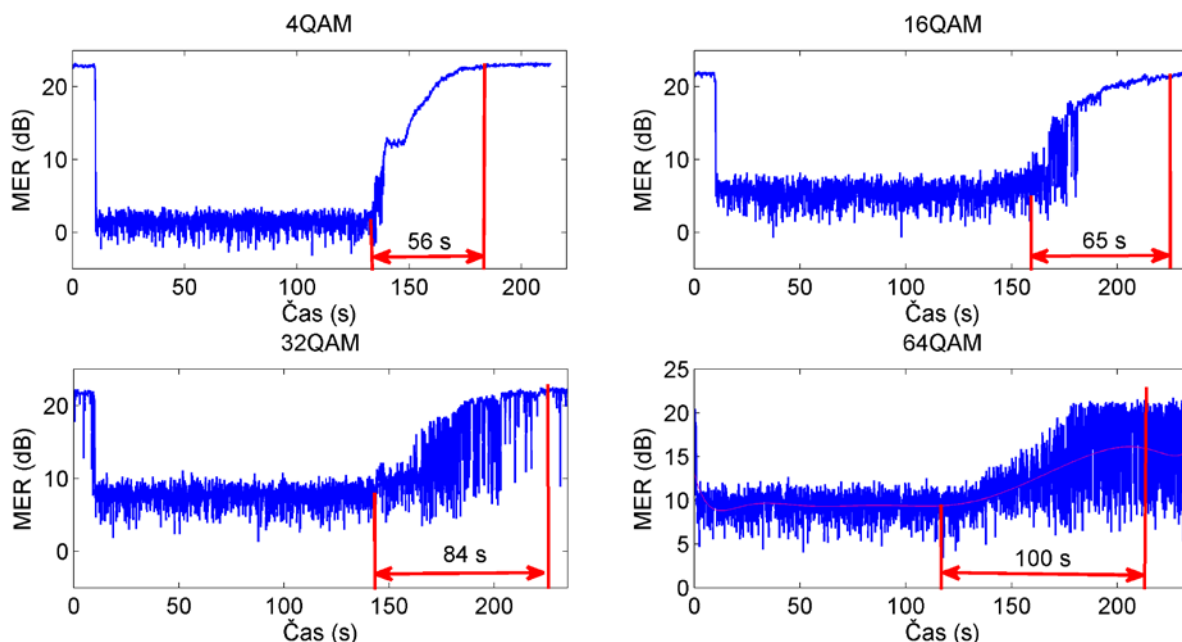
p-hodnota 650 nm = 0,27 $>$ 0,05; Na hladině významnosti 95 % nezamítáme nulovou hypotézu

p-hodnota 850 nm = 0,30 $>$ 0,05; Na hladině významnosti 95 % nezamítáme nulovou hypotézu

Rozhodnutí: Na základě p-hodnot nelze zamítnout nulovou hypotézu. Mezi dosaženými časy pro PSK modulace není statisticky významný vliv pro obě vlnové délky.

8.4.2.2 *QAM modulace*

Časy k dosažení původní hodnoty MER jsou v tabulce 8.35. Na níže uvedených grafech je zobrazeno, jak vypadají časové průběhy QAM modulací. U modulací 16QAM a vyšších docházelo při rozpadávání mlhy k oscilacím hodnoty MER, kdežto modulace 4QAM měla plynulý náběh.



Obrázek 8.55: Časové průběhy QAM modulací při působení mlhy vzniklé sublimací suchého ledu

Tabulka 8.35: Hodnoty časů, za kterých dané QAM modulace dosáhly původní hodnoty

Číslo měření		Čas (s)			
		4QAM	16QAM	32QAM	64QAM
1	650 nm	42	41	43	78
	850 nm	58	43	38	123
2	650 nm	47	54	54	93
	850 nm	56	50	84	100
3	650 nm	37	51	40	50
	850 nm	46	65	47	59

Tabulka 8.36: Hodnoty časů, za kterých dané modulace dosáhly původní hodnoty

V první řadě bude otestována normalita dat, pro určení výběru následujícího testování.

Normalita dat

H_0 : Data pochází z normálního rozdělení

H_A : $\neg H_0$

Použitý test: Shapiro-Wilkův test

Tabulka 8.37: Tabulka p-hodnot testování normality

λ	p-hodnota			
	4QAM	16QAM	32QAM	64QAM
650 nm	0,99	0,42	0,39	0,67
850 nm	0,29	0,60	0,35	0,69

Rozhodnutí: Na základě p-hodnot (všechny p-hodnoty $> 0,05$) nezamítáme nulovou hypotézu na hladině spolehlivosti 95 %. Data pochází z normálního rozdělení.

Hypotéza

H_0 : Časy pro dosažení původní hodnoty MER jednotlivých modulací jsou statisticky nevýznamné

H_A : $\neq H_0$

Použitý test: ANOVA

p-hodnota 650 nm = 0,048 $>$ 0,05; Na hladině významnosti 95 % zamítáme nulovou hypotézu

p-hodnota 850 nm = 0,12 $>$ 0,05; Na hladině významnosti 95 % nezamítáme nulovou hypotézu

Rozhodnutí: Na základě p-hodnoty nezamítáme nulovou hypotézu v případě vlnové délky 850 nm. U vlnové délky 650 nm nulovou hypotézu zamítáme. Statisticky významnou skupinou je v tomto případě modulace 64QAM.

9 Měření změny polarizace optického svazku působením atmosférických vlivů

Tato kapitola se věnuje měřením změny polarizace modulovaného optického svazku, který je vytvářen stejným způsobem jako u předešlých měření v kapitole 8. Rozdíl je v nahrazení detektoru a jednoho USRP zařízení za polarimetr Thorlabs TXP 5004 a snímací hlavici PAN5710IR3 určenou pro vlnové délky 1300 až 1700 nm. Jako zdroj záření byla použita LD dioda na vlnové délce 1550 nm (ML925B45F). Za pomoci polarimetru jsou logovány parametry polarizace, a to elipticita a azimut, určující umístění na Poincarého kouli. Z těchto parametrů bude provedena statistická analýza a pomocí testování hypotéz určeno zdali je statisticky významný rozdíl mezi referenčním prostředím bez turbulencí a působením určitých atmosférických jevů.

Před samotným měřením je nutno nasměrovat co nejlépe optický svazek na hlavici polarimetru. K nasměrování svazku bylo využito detekční kartičky, která má na sobě vrstvu, jež reaguje na určité vlnové délky a je možno vidět stopu svazku. Protože je použita vlnová délka 1550 nm, je to jediné řešení jak správně svazek nasměrovat. Po namíření svazku na hlavici ještě došlo ke korekci, pomocí mikroposuvu držáku, ve kterém byla uchycena hlavice, podle aplikace, ve které lze vidět Poincarého kouli se Stokeho parametry a úroveň výkonu. Podle dopadajícího výkonu byl korigován svazek. Při posouvání pomocí mikroposuvu byla hlavice nasměrována do místa, na které dopadal největší výkon. Při tomto nasměrování byla úroveň stupně polarizace téměř 100%, což značí správné nastavení.

Polarimetr je poměrně dost náchylný na otřesy v místnosti, proto je v následné explorační analýze nutno pomocí krabicových grafů odhalit tyto odlehlá pozorování a odstranit je, aby nevznášela do statistických výsledků a testování hypotéz chybu. Jelikož známe původ těchto odlehlých pozorování, je možné je smazat.



Obrázek 9.1: Polarimetr TXP 5004 se snímací hlavici PAN5710IR3

9.1 Měření polarizace v referenčním klidném prostředí

Měření probíhalo tak, že v laboratorním boxu byly vypnuty veškeré ventilátory a zadělán kryt boxu, aby bylo docíleno co nejklidnějšího prostředí uvnitř boxu. Tudíž se jednalo o prostředí bez turbulencí s konstantní pokojovou teplotou. V tomto kroku byly měřeny polarizace pro modulovaný

optický svazek všemi osmi modulacemi a následně otestování pomocí statistických hypotéz, jestli má použitá modulace vliv na změnu polarizace. Jak se níže ukázalo, použitý modulační formát nemá statisticky významný vliv na výslednou polarizaci.

Tabulka 9.1: *Hodnoty elipticity a azimutu dle modulovaného svazku pro referenční prostředí*

		QPSK	$\pi/4$ DQPSK	8PSK	16PSK	4QAM	16QAM	32QAM	64QAM
Elipticita (deg)	Průměr	2,27	2,28	2,27	2,27	2,27	2,27	2,27	2,27
	Směrodatná odchylka	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03
	Počet vzorků	2000	2000	1993	1968	2000	2000	2000	2000
Azimut (deg)	Průměr	7,15	7,15	7,15	7,15	7,15	7,15	7,15	7,15
	Směrodatná odchylka	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
	Počet vzorků	2000	2000	1987	1987	2000	2000	1999	1999

Z tabulky 9.1 vidíme, že hodnoty elipticity i azimutu v případě použití různých modulací jsou stejné, proto pomocí testování hypotéz určíme, zdali jsou data statisticky významně rozdílná či nikoliv.

9.1.1 Testování hypotéz

Nejprve je třeba otestovat hypotézu, jestli data pochází z normálního rozdělení. Pokud bude normalita splněna u všech dat, můžeme zvolit test ANOVA. V opačném případě pokud normalita není splněna (stačí, aby jedna splněna nebyla) bude zvolen test Kruskal-Wallis.

Normalita dat

H_0 : Data pochází z normálního rozdělení

$H_A : !H_0$

Použitý test: Kolmogorov-Smirnov test

Tabulka 9.2: *P-hodnoty testování normality*

	p-hodnota							
	QPSK	$\pi/4$ DQPSK	8PSK	16PSK	4QAM	16QAM	32QAM	64QAM
Elipticita	3,06E-08	5,40E-07	2,90E-07	5,80E-08	2,00E-08	0,00E+00	0,00E+00	1,20E-08
Azimut	4,80E-08	0	0	0	0	0	2,10E-08	6,60E-08

Rozhodnutí: Na základě p-hodnot z tabulky výše zamítáme nulovou hypotézu (p-hodnota < 0,05). Na hladině spolehlivosti 95 % můžeme tvrdit, že data nepochází z normálního rozdělení a zvolíme test K-W.

Hypotéza

H_0 : Hodnoty elipticity a azimutu jsou stejné pro všechny modulace

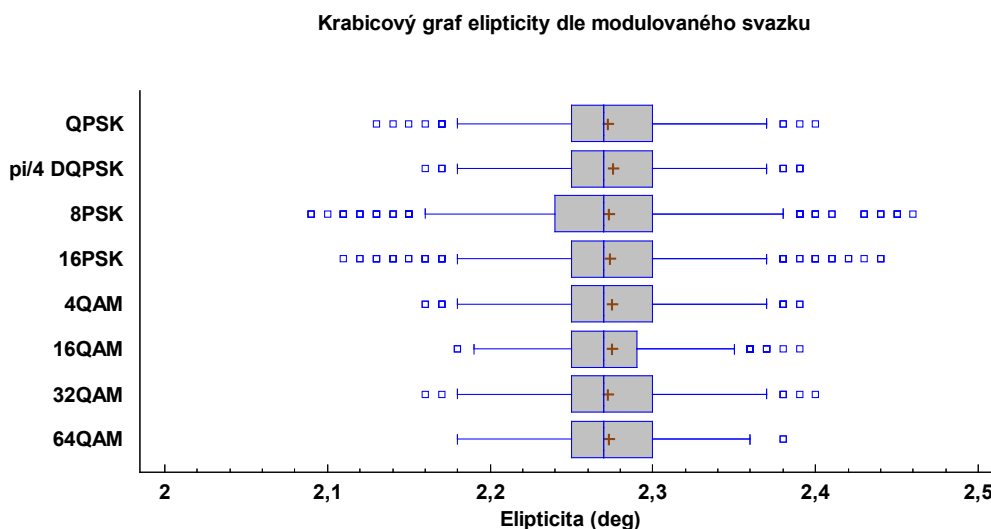
$H_A : !H_0$

Použitý test: Kruskal-Wallis

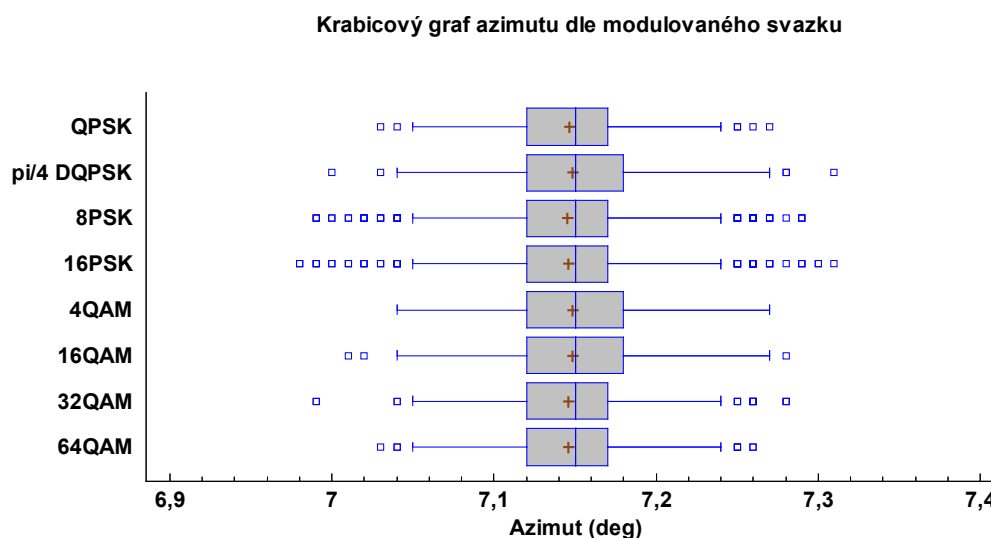
p-hodnota elipticity = $0,15 > 0,05$

p-hodnota azimutu = $0,08 > 0,05$

Rozhodnutí: Na základě p-hodnot nezamítáme nulovou hypotézu, mezi daty neexistuje statisticky významný rozdíl na hladině spolehlivosti 95 %. Nezamítnutí nulové hypotézy dosvědčují krabicové grafy (obrázek 9.2 a obrázek 9.3), na kterých vidíme, že leží nad sebou, což značí, že není mezi nimi statisticky významný rozdíl.



Obrázek 9.2: Krabicový graf elipticity pro referenční prostředí



Obrázek 9.3: Krabicový graf azimutu pro referenční prostředí

9.2 Vliv mechanických a teplotních turbulencí

Měření se skládá ze sedmi kroků. První referenční krok klidné prostředí a dále tři turbulentní (různá rychlost proudění vzduchu) a tři teplotní turbulence (různá rychlost a teplota). Protože nebyla zamítnuta nulová hypotéza (mezi polarizací optického svazku modulovaného různými modulacemi

není statisticky významný rozdíl) byla vybrána z každé skupiny jedna modulace (QPSK a 16QAM), se kterými je provedeno měření vlivu turbulencí na modulovaný optický svazek.

Schéma měření je podobné jako na obrázku 8.10 s tím rozdílem, že je detektor a demodulátor vyměněn za polarimetr se snímací hlavicí a byly vždy použity všechny tři ventilátory. Měření probíhalo v daném kroku 15 minut. Nejprve byla měřena mechanická turbulence se třemi stupni otáček ventilátorů a následně to samé s přidáním tepelnými ohřivači. Pomocí anemometru byla změřena rychlost proudění vzduchu a také teplota.

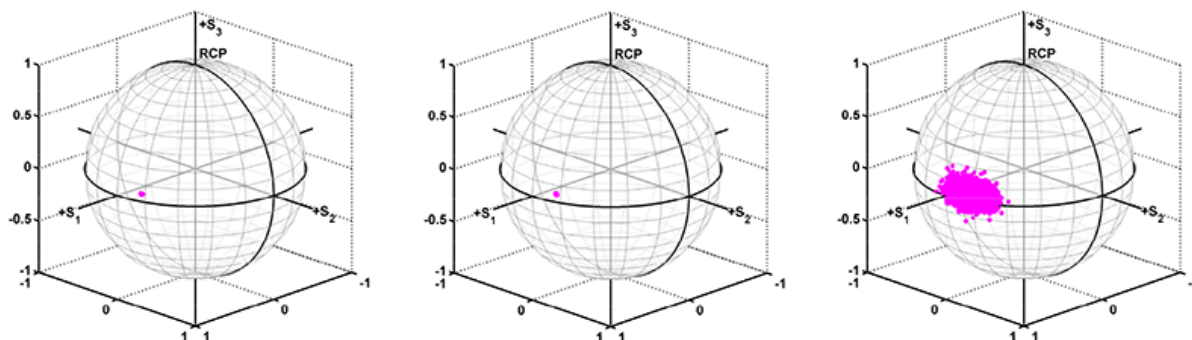
Tabulka 9.3: *Explorační analýza naměřených dat jednotlivých kroků vlivu turbulencí*

		Bez turbulence	Mechanická turbulence			Teplotní turbulence		
			2,5 m/s	4,2 m/s	5,4 m/s	50 °C 2,9 m/s	45,7 °C 5,5 m/s	42 °C 8,2 m/s
QPSK Elipťičita (deg)	Průměr	2,27	2,27	2,22	2,19	1,84	1,89	1,96
	Směrodatná odchylka	0,02	0,06	0,05	0,74	1,49	0,93	0,82
	Počet vzorků	29999	29901	29915	30000	29996	29997	30000
16QAM Elipťičita (deg)	Průměr	2,27	2,27	2,22	2,19	1,81	1,89	1,96
	Směrodatná odchylka	0,02	0,05	0,05	0,72	1,35	0,93	0,83
	Počet vzorků	29996	29937	29978	30000	29998	29999	30000
QPSK Azimut (deg)	Průměr	7,82	7,8	7,79	7,76	7,78	7,72	7,75
	Směrodatná odchylka	0,02	0,07	0,06	0,16	2,73	1,78	1,48
	Počet vzorků	28267	29877	29954	29998	29998	30000	30000
16QAM Azimut (deg)	Průměr	7,82	7,8	7,79	7,77	7,75	7,74	7,76
	Směrodatná odchylka	0,03	0,06	0,05	0,16	2,46	1,79	1,49
	Počet vzorků	28104	29959	29983	29999	29999	29999	29999

V tabulce 9.3 je explorační analýza dat jednotlivých měřených kroků pro obě modulace. Před samotným testováním hypotéz bude provedeno statistické srovnání hodnot QPSK modulace s modulací 16QAM. Pokud budou statisticky nerozdílné, což se dá dle tabulky předpokládat, bude testování hypotéz provedeno pouze pro jednu modulaci, protože by výsledky testování hypotéz u druhé modulace dopadly stejně.

Nejdříve je však nutné zhodnotit naměřené výsledky. Ze samotných průměrů by šlo tvrdit, že u mechanických turbulencí k velké změně nedochází, například u nejhoršího výsledku mechanické turbulence 5,4 m/s došlo k rozdílu (u modulace QPSK) elipticity o 0,08° a u azimutu o 0,06°, avšak důležité je se podívat, že mechanickými turbulencemi se zvětšila směrodatná odchylka, což značí větší kolísání hodnot, ale průměr se drží přibližně kolem původní hodnoty referenčního prostředí. Znatelnější rozdíl nastává u teplotní turbulence. Zde nastává difference oproti referenčnímu prostředí až o 0,46° u elipticity a o 0,1° u azimutu. Velmi se teplotními turbulencemi zvětšila směrodatná odchylka, která je v řádu desetin i jednotek, kdežto u mechanických turbulencí se držela v řádu setin s výjimkou nejvyšší turbulence, kde dosáhla řádu desetin. Můžeme tak předpokládat, že vliv mechanických i teplotních turbulencí je statisticky významný, což bude ověřeno testováním hypotéz. Nejdříve však bude provedeno statistické srovnání jednotlivých modulací.

Zajímavý poznatek je, že u teplotních turbulencí dochází zvýšením otáček ventilátoru k ochlazení proudu vzduchu z ohřívače a dochází tak k poklesu teploty. Z naměřených dat je patrné, že větší vliv má velikost teploty než síla proudění vzduchu. Mezi prvním a třetím stupněm teplotní turbulence je rozdíl 8 °C a 5,3 m/s. K nejhorším výsledkům dochází právě při nejmenší mechanické turbulenci avšak s největší teplotou, kdežto k nejlepším výsledkům teplotní turbulence dochází právě při nejnižší teplotě a nejvyšší mechanické turbulenci.



Obrázek 9.4: Zobrazení naměřených dat na Poincarého kouli, zleva: referenční prostředí, mechanické turbulence a teplotní turbulence

Na výše uvedeném obrázku 9.4 jsou data zobrazena na Poincarého kouli pro představu, jak jsou jednotlivá data rozprostřena. Mezi referenčním prostředím a prostředím s mechanickými turbulencemi je zřejmé, že data se příliš neodchylovala od původní hodnoty, což je také zřejmé z předešlé tabulky, ale malé difference se zde nachází. Zajímavější je pohled na prostředí s teplotními turbulencemi. Zde vidíme, jak jsou naměřené body poměrně dost rozprostřeny, což je zapříčiněno zmíněnou velkou směrodatnou odchylkou.

Nyní bude provedeno již zmíněné porovnání naměřených dat výsledků optického svazku modulovaného modulací QPSK a 16QAM.

Test normality dat

H_0 : Data pochází z normálního rozdělení

$H_A : !H_0$

Použitý test: Kolmogorov-Smirnov test

Tabulka 9.4: P-hodnoty testování normality dat

		p-hodnota						
		Bez turbulence	Mechanická turbulence			Teplotní turbulence		
			2,5 m/s	4,2 m/s	5,4 m/s	50 °C 2,9 m/s	45,7 °C 5,5 m/s	42 °C 8,2 m/s
QPSK	Elipticita	0	0	0	0	0	0	0
	Azimut	0	0	0	0	0	0	0
16QAM	Elipticita	0	0	0	0	0	0	0
	Azimut	0	0	0	0	0	0	0

Rozhodnutí: Na základě p-hodnot je patrné, že data nepochází z normálního rozdělení a pro testování je nutné použít Mann-Whitneyův test o shodě mediánů.

Hypotéza

H_0 : Mediány naměřených dat QPSK a 16QAM jsou shodné

$H_A : !H_0$

Použitý test: Mann-Whitneyův

Tabulka 9.5: *P-hodnoty Mann-Whitneyova testu*

	p-hodnota						
	Bez turbulence	Mechanická turbulence			Teplotní turbulence		
		2,5 m/s	4,2 m/s	5,4 m/s	50 °C 2,9 m/s	45,7 °C 5,5 m/s	42 °C 8,2 m/s
Elipticita	0,29	0,14	0,19	0,57	0,06	0,67	0,47
Azimut	0,10	0,11	0,16	0,06	0,15	0,25	0,42

Rozhodnutí: Na základě p-hodnot nebyla zamítnuta ani jedna nulová hypotéza. Můžeme tak na intervalu spolehlivosti 95 % tvrdit, že mezi daty není statisticky významný rozdíl a můžeme tak dále statisticky testovat jednu z modulací a pro druhou výsledky budou platit také.

Jednotlivé krabicové grafy pro naměřené kroky jsou uvedeny v elektronické příloze.

9.2.1 Testování hypotéz

V této podkapitole budou provedeny statistické hypotézy, jestli existuje statisticky významný rozdíl mezi referenčním prostředím a mechanickou či teplotní turbulencí, a také má-li vliv změna rychlosti a teplota proudění na výslednou hodnotu polarizačního stavu. Data jsou použita z modulovaného svazku QPSK modulace.

Na základě tabulky 9.2 byla zamítnuta nulová hypotéza, že data pochází z normálního rozdělení, a proto bude pro následné testování použit test Kruskal-Wallis.

Hypotéza

H_0 : Elipticita a azimut jsou pro klidné a turbulentní prostředí stejná

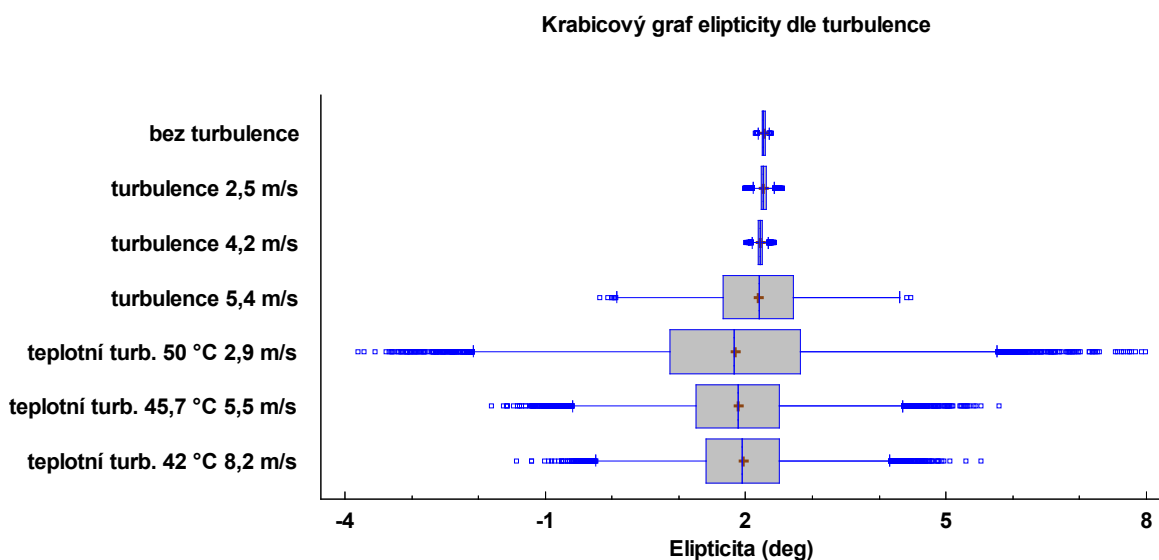
$H_A : !H_0$

Použitý test: Kruskal-Wallis

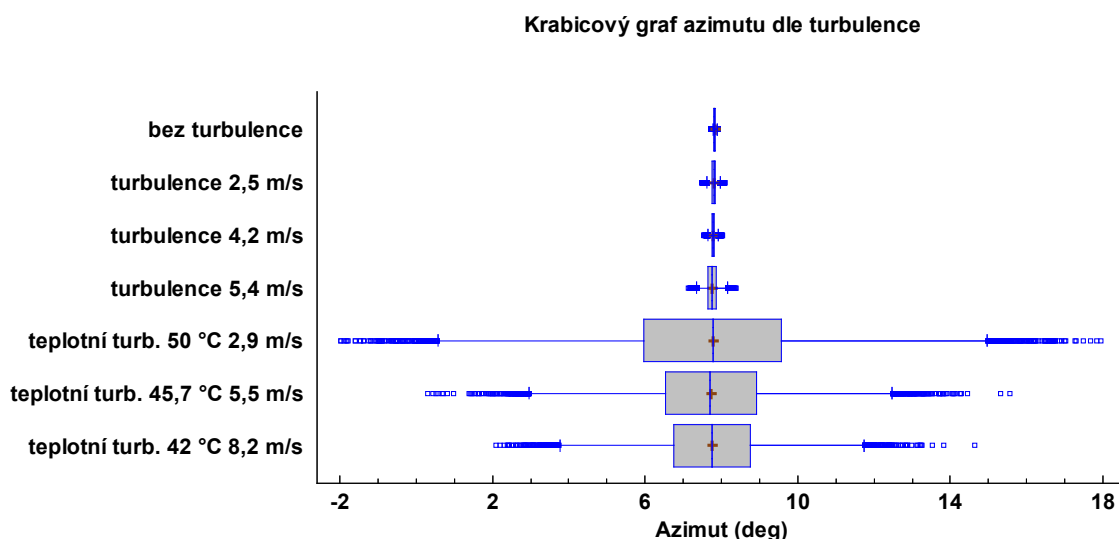
p-hodnota elipticity = 0 < 0,05; Zamítáme nulovou hypotézu na hladině spolehlivosti 95 %

p-hodnota azimutu = 0 < 0,05; Zamítáme nulovou hypotézu na hladině spolehlivosti 95 %

Rozhodnutí: Na základě p-hodnot zamítáme nulovou hypotézu. Mezi prostředím existuje statisticky významný vliv. Protože je zamítnuta nulová hypotéza, je možné provést post-hoc analýzu pro zjištění statisticky rozdílných skupin.



Obrázek 9.5: *Krabicový graf elipticity dle typu turbulentního prostředí*

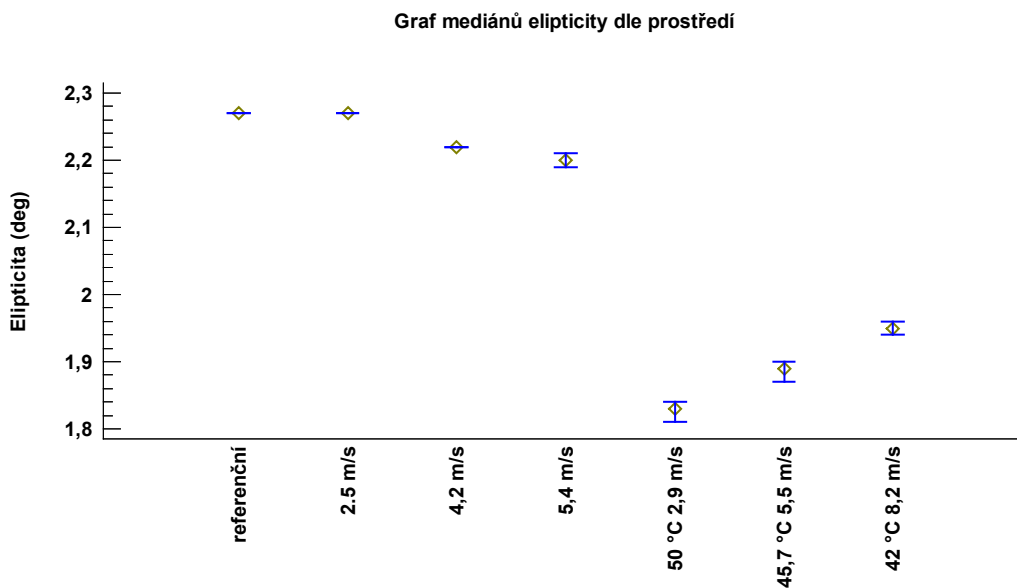


Obrázek 9.6: *Krabicový graf azimutu dle typu turbulentního prostředí*

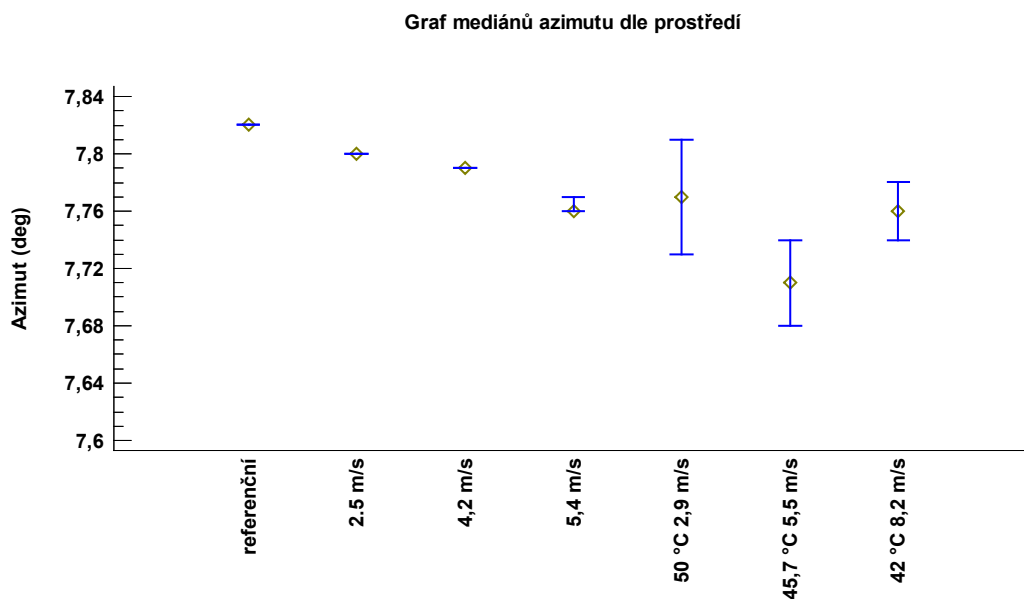
Z krabicových grafů výše lze usoudit, že statistickými rozdílnými skupinami budou všechny kombinace. Pouze v případě bezturbulentního a turbulentního prostředí při proudění 2,5 m/s se zdají být krabicové grafy podobné. Post-hoc analýzou pomocí srovnání dvojic Mann-Whitney testem budou rozdílné skupiny odhaleny. V příloze C je zvětšený graf, aby byl vidět rozdíl mezi bezturbulentním prostředím a prostředím s mechanickými turbulencemi.

Protože je použit test o shodě mediánů, graficky může posloužit graf porovnávající mediány daných prostředí, viz následující dva grafy. V případě elipticity byla nalezena jedna statisticky nevýznamná skupina, a to referenční prostředí – mechanická turbulence 2,5 m/s. Další dvojice mezi sebou mají statisticky významný rozdíl. U parametru azimutu bylo nalezeno více nezávislých skupin, a to mechanická turbulence 5,4 m/s – teplotní turbulence 50 °C, mechanická turbulence 5,4 m/s - teplotní turbulence 42 °C a teplotní turbulence 50 °C 2,9 m/s – 42 °C 8,2 m/s. Jedná se

ovšem o shodu mediánů, avšak při pohledu na krabicový graf (obrázek 9.6) je patrný rozdíl ve formě rozptylu dat, proto lze usoudit, že teplotní turbulence má daleko větší vliv.



Obrázek 9.7: Graf mediánů parametru elipticity dle prostředí pro zjištění významných skupin



Obrázek 9.8: Graf mediánů parametru azimutu dle prostředí pro zjištění významných skupin

Hypotéza

H_0 : Elipticita a azimut jsou u mechanické turbulence při změně rychlosti proudění stejné

$H_A : \neg H_0$

Použitý test: Kruskal-Wallis

p-hodnota elipticity = 0 < 0,05; Zamítáme nulovou hypotézu na hladině spolehlivosti 95 %

p-hodnota azimutu = 0 < 0,05; Zamítáme nulovou hypotézu na hladině spolehlivosti 95 %

Rozhodnutí: Na základě p-hodnot zamítáme nulovou hypotézu. Na hladině spolehlivosti můžeme tvrdit, že změna rychlosti proudění má statisticky významný vliv na výslednou změnu polarizace. Statisticky významné skupiny jsou mezi všemi skupinami jak u elipticity tak azimutu, viz grafy mediánů (obrázek 9.7 a obrázek 9.8).

Hypotéza

H_0 : Elipticita a azimut jsou u teplotní turbulence při změně rychlosti a teploty proudění stejné

$H_A : !H_0$

Použitý test: Kruskal-Wallis

p-hodnota elipticity = 0 < 0,05; Zamítáme nulovou hypotézu na hladině spolehlivosti 95 %

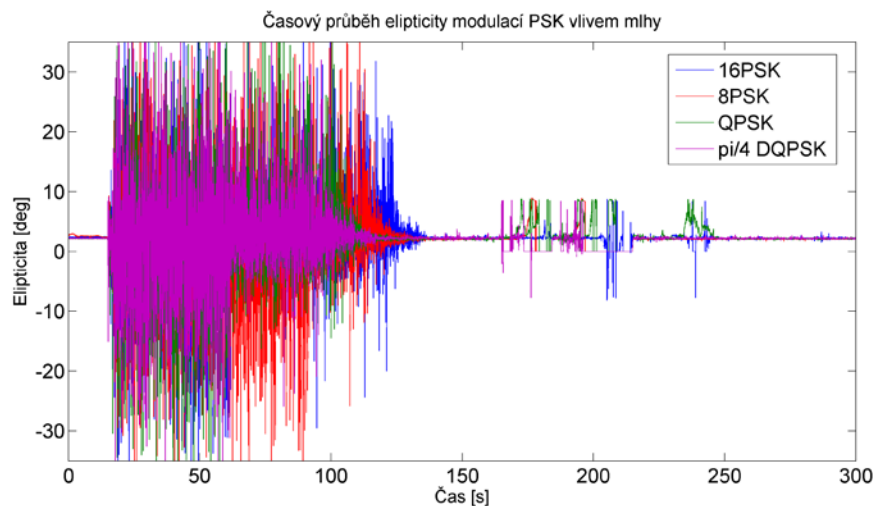
p-hodnota azimutu = 0,002 < 0,05; Zamítáme nulovou hypotézu na hladině spolehlivosti 95 %

Rozhodnutí: Na základě p-hodnot zamítáme nulovou hypotézu. Na hladině spolehlivosti můžeme tvrdit, že změna rychlosti proudění a teploty má statisticky významný vliv na výslednou změnu polarizace. Statisticky významné skupiny jsou u elipticity mezi všemi skupinami a u azimutu je jedna skupina statisticky nevýznamná, a to turbulence 50 °C 2,9 m/s – 42 °C 8,2 m/s, viz grafy mediánů (obrázek 9.7 a obrázek 9.8).

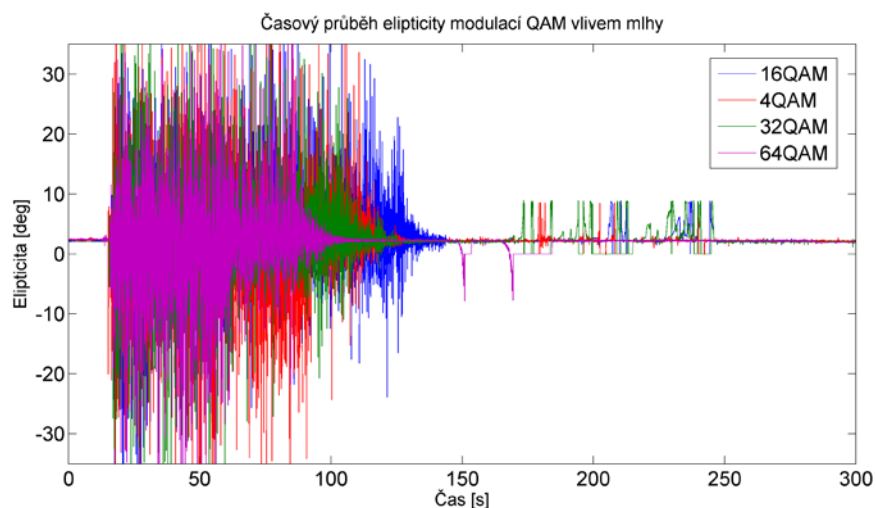
9.3 Vliv mlhy na změnu polarizace

9.3.1 Mlha vzniklá sublimací suchého ledu

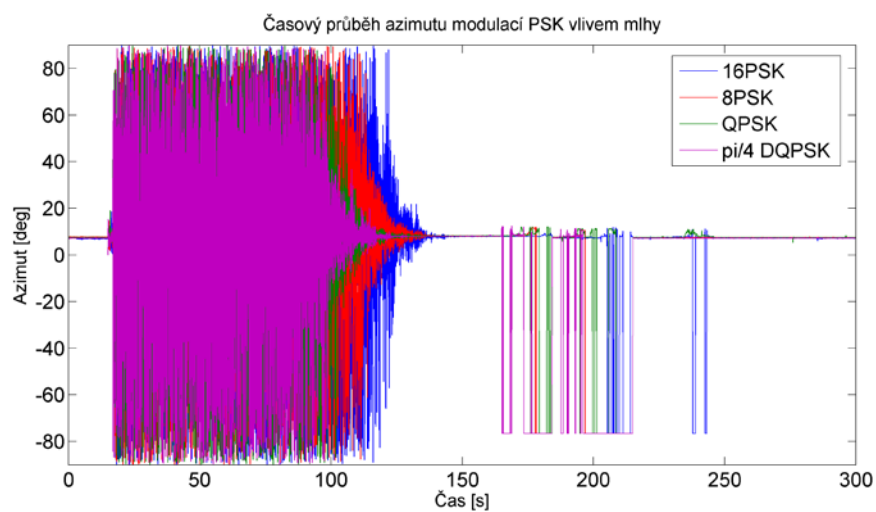
Byl třikrát změřen časový průběh polarizace (azimutu a elipticity) na modulovaný svazek, na který působila mlha tvořena sublimací suchého ledu. Po sublimaci ledu bylo spuštěno logování dat a po patnácti sekundách byla mlha po dobu pěti vteřin rozfoukána větrákem po celém boxu. Došlo tak k velkému útlumu vlivem mlhy a proto lze vidět v grafech průběhu elipticity a azimutu, jak hodnoty oscilují. Po dobu průběžného rozpadu mlhy dochází k ustálení parametrů modulace na původní hodnoty s jemným rozptylem vlivem působení horké vody, ze které se odpařuje voda a také působí na svazek. Na následujících obrázcích jsou zobrazeny ukázky průběhů elipticity a azimutu. V grafu lze vidět, jak po 15 vteřinách byla mlha rozfoukána a došlo tak k velké oscilaci parametrů polarizace. Po ustálení hodnot docházelo, místy, k výkyvům nejspíše vlivem měřicího přístroje, protože se tento děj opakoval při každém měření.



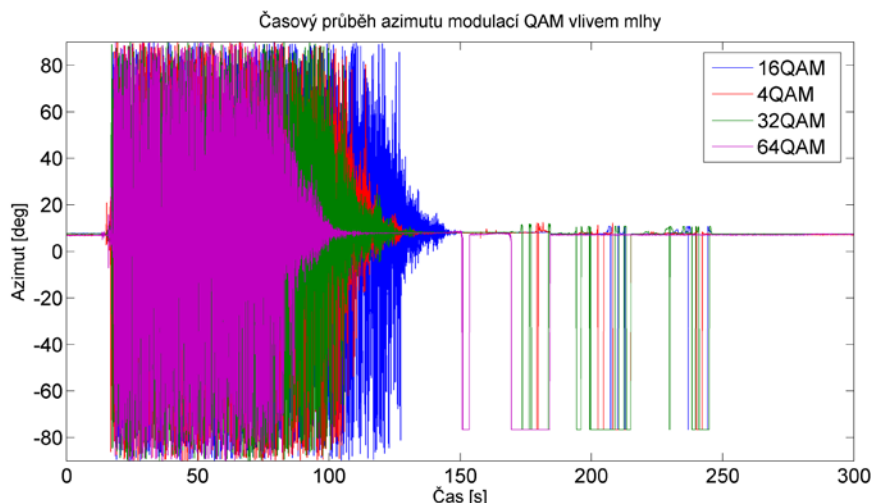
Obrázek 9.9: Časový průběh elipticity PSK modulací při působení mlhy



Obrázek 9.10: Časový průběh elipticity QAM modulací při působení mlhy



Obrázek 9.11: Časový průběh azimutu PSK modulací při působení mlhy



Obrázek 9.12: Časový průběh azimutu QAM modulací při působení mlhy

Z jednotlivých průběhů byly zjištěny časy, po které se parametry polarizace modulovaného optického svazku ustálily na původní hodnotě. Tyto časy zobrazuje následující tabulka.

Tabulka 9.6: Časy ustálení parametrů polarizace na původní hodnotu

	Čas do dosažení původní hodnoty elipticity a azimutu (s)							
Měření	QPSK	$\pi/4$ DQPSK	8PSK	16PSK	4QAM	16QAM	32QAM	64QAM
1	79	120	114	110	104	112	130	103
2	115	63	109	135	150	134	94	120
3	105	104	121	123	114	130	113	92

Explorační analýza jednotlivých modulací je shrnuta v tabulce 9.7. Po explorační analýze následuje testování, zdali data pochází z normálního rozdělení, a na základě výsledku testu bude proveden test ANOVA nebo Kruskal-Wallisův test. Test na normalitu dat je proveden pomocí Shapiro-Wilkova testu. Výsledky tohoto testu jsou uvedeny také v tabulce 9.7.

Test normality dat

H_0 : Data pochází z normálního rozdělení

$H_A : !H_0$

Použitý test: Shapiro-Wilkův test

Tabulka 9.7: Explorační analýza výsledků a p-hodnota testování normality dat

	QPSK	$\pi/4$ DQPSK	8PSK	16PSK	4QAM	16QAM	32QAM	64QAM
Počet měření	3	3	3	3	3	3	3	3
Průměr	99,6667	95,6667	114,667	122,667	122,667	125,333	112,333	105
Směrodatná odchylka	18,5831	29,3995	6,02771	12,5033	24,1937	11,7189	18,0093	14,1067
P-hodnota S-W testu	0,52	0,52	0,82	0,96	0,4	0,33	0,94	0,76
Zamítnutí H_0	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE

Rozhodnutí: Na základě p-hodnot v předešlé tabulce nezamítáme nulovou hypotézu, že data pochází z normálního rozdělení. Může tak být použit test ANOVA.

Nyní bude určeno pomocí testování hypotéz, zdali se časy jednotlivých průběhů dle použité modulace statisticky významně liší. Jelikož nebyla zamítnuta normalita dat je možno použít test ANOVA.

Hypotéza

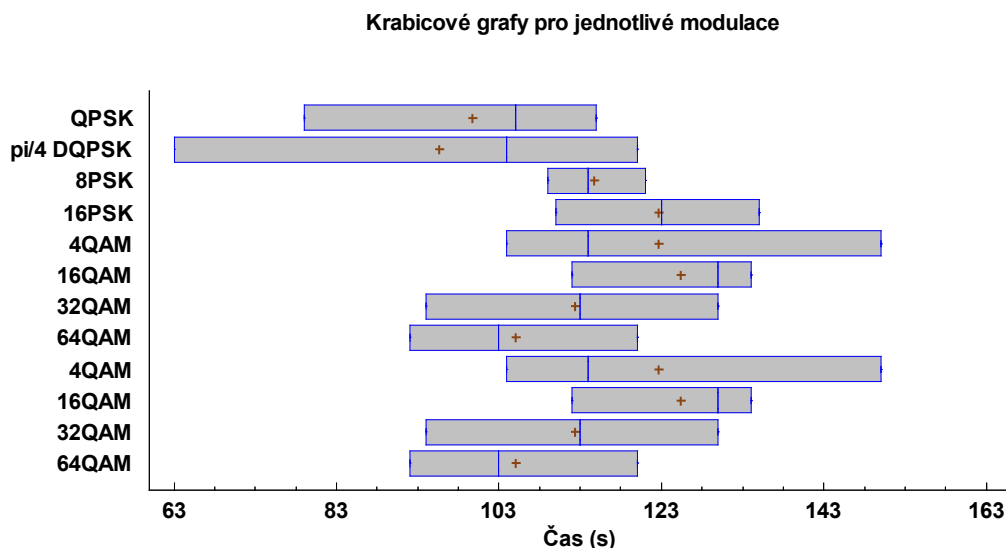
H_0 : Střední hodnoty časů jsou stejné

$H_A : !H_0$

Použitý test: ANOVA

p-hodnota = 0,47 > 0,05; Nezamítáme nulovou hypotézu na hladině spolehlivosti 95 %

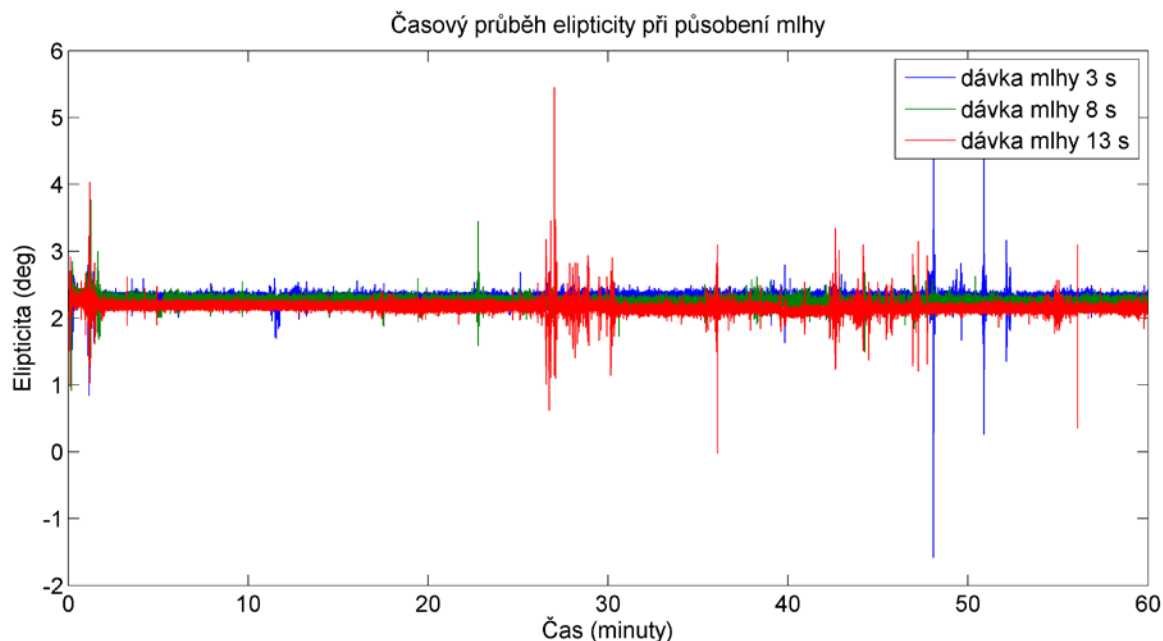
Rozhodnutí: Protože p-hodnota je větší než 0,05 nezamítáme nulovou hypotézu. Na hladině spolehlivosti 95 % tak můžeme tvrdit, že mezi časy jednotlivých modulací není statisticky významný rozdíl.



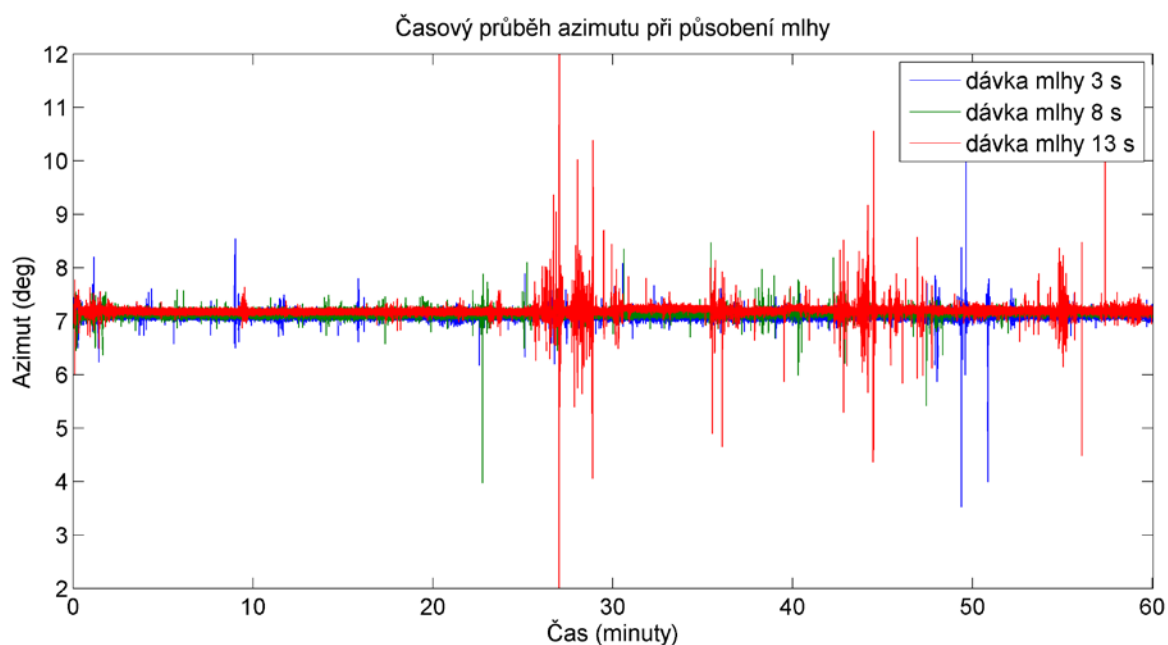
Obrázek 9.13: Krabicový graf časů dle modulace

9.3.2 Glycerinová mlha z mlhovače

V tomto měření bylo testováno jaký vliv má mlha tvořená glycerinovým mlhovačem. Byly vytvořeny tři dávky mlhy 3, 8 a 13 sekund a měření polarizace bylo měřeno po dobu šedesáti minut, protože u tohoto druhu mlhy dochází k velmi pomalému rozpadu. Byly vytvořeny dva časově závislé grafy průběhu parametru elipticity a azimutu. Tyto grafy jsou na obrázcích níže.



Obrázek 9.14: *Průběh elipticity při působení mlhy*



Obrázek 9.15: *Průběh azimutu při působení mlhy*

Z jednotlivých průběhů vidíme, že mlha nemá nikterak velký vliv na změnu polarizace. Objevují se určité zákmity, které však mohou mít důsledek ve formě otřesů v místnosti vlivem chůze. Při pohledu na místa, kde tyto rozkmity nejsou, si jednotlivé průběhy drží rozptýl i původní hodnotu. Nedochází k výraznějším změnám ani při postupném rozpadu mlhy. Je vidět, že hodnota po šedesáti minutách se výrazně nezměnila oproti počátku, kdy měla mlha největší koncentraci. Dále také doba dávky mlhy nemá výraznější vliv na výsledné průběhy.

Jednotlivé časové průběhy byly rozděleny po desetiminutových úsecích, ze kterých byla provedena explorační analýza, aby bylo vidět, kolem jaké střední hodnoty polarizace osciluje a také

s jakou směrodatnou odchylkou, která může v porovnání s výsledky turbulencí určit, jestli má mlha menší či větší vliv na změnu výsledné polarizace.

Explorační analýzu zachycuje následující tabulka, která je rozdělena dle dávky mlhy a pěti desetiminutových časových intervalů plus interval před vstříknutím mlhy do laboratorního boxu. V případě parametru elipticity docházelo k diferencím střední hodnoty o $0,04^\circ$ u tří sekundové dávky mlhy, $0,11^\circ$ u osmi sekundové dávky mlhy a o $0,14^\circ$ u třináctisekundové sekundové dávky mlhy. Je tak možné říct, že s větší dávkou dochází k větším diferencím s přibližně stejnými směrodatnými odchylkami. Směrodatná odchylka u žádné dávky v případě parametru elipticity nepřesáhla jednu desetinu stupně. U azimutu docházelo k diferencím střední hodnoty $0,02^\circ$ u tří sekundové dávky mlhy, $0,04^\circ$ u osmi sekundové dávky mlhy a o $0,03^\circ$ u třináctisekundové sekundové dávky mlhy. Parametr azimutu tak byl ovlivněn méně než parametr elipticity. Směrodatná odchylka u azimutu se držela ve většině případů do jedné desetiny stupně s výjimkou třináctisekundové dávky mlhy, kde směrodatná odchylka dosahovala maximální hodnoty $0,17^\circ$, což však dle časového průběhu je místo s většími zákmity, které byly nejspíše způsobené zmíněnými otřesy v místnosti. Jinak se směrodatná odchylka i u této dávky mlhy držela do jedné desetiny stupně.

Tabulka 9.8: *Explorační analýza časových úseků polarizace při působení mlhy*

Dávka mlhy			Čas (minuty)					
			0	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60
3 s	elipticita	Průměr	2,33	2,29	2,30	2,31	2,30	2,30
		Směrodatná odchylka	0,04	0,06	0,05	0,05	0,08	0,08
		Počet vzorků	800	20000	20000	20000	20000	20000
	azimut	Průměr	7,10	7,11	7,11	7,11	7,11	7,12
		Směrodatná odchylka	0,04	0,05	0,05	0,05	0,08	0,06
		Počet vzorků	800	20000	20000	20000	20000	20000
8 s	elipticita	Průměr	2,36	2,26	2,25	2,25	2,25	2,25
		Směrodatná odchylka	0,04	0,05	0,05	0,04	0,05	0,04
		Počet vzorků	800	20000	20000	20000	20000	20000
	azimut	Průměr	7,12	7,15	1,15	7,15	7,15	7,16
		Směrodatná odchylka	0,04	0,05	0,06	0,05	0,06	0,04
		Počet vzorků	800	20000	20000	20000	20000	20000
13 s	elipticita	Průměr	2,27	2,18	2,17	2,14	2,13	2,14
		Směrodatná odchylka	0,04	0,05	0,09	0,06	0,07	0,05
		Počet vzorků	800	20000	20000	20000	20000	20000
	azimut	Průměr	7,18	7,18	7,18	7,21	7,21	7,19
		Směrodatná odchylka	0,04	0,03	0,17	0,08	0,11	0,08
		Počet vzorků	800	20000	20000	20000	20000	20000

9.4 Vliv deště

Podobně jako u měření vlivu deště na modulační formát byly i v tomto měření použity tři typy deště a u každého typu se dvěma průtoky. Schéma měření je stejné jako na obrázku 8.27, akorát došlo k výměně modulátoru za polarimetr a snímací hlavici. Měření bylo provedeno s každou modulací po dobu pěti minut. Z naměřených hodnot byla provedena explorační analýza, která je v příloze v tabulkách B.5 a B.6. Z hodnot je patrné, že déšť má také vliv na mírnou změnu parametrů elipticity a azimutu. Z pohledu vzniklých směrodatných odchylek dochází k největším odchylkám u hrubého deště a nejmenším u mrholení. Z pohledu srovnání těchto odchylek s působením turbulencí, vychází odchylky u elipticity srovnatelné jako v případě teplotních turbulencí a u azimutu jsou u deště mírně vyšší. V případě deště jsou také větší difference oproti referenčnímu prostředí než v případě teplotních turbulencí. Difference jsou uvedeny v následující tabulce. Nejhorší difference u elipticity se dosahuje u jemného deště a u azimutu pro 100 % průtok u hrubého deště a při 50 % opět jemný déšť. U teplotní turbulence dosahovala největší odchylka $0,46^\circ$ u elipticity a $0,1^\circ$ u azimutu. Lze si všimnout, že v případě elipticity odchylky nejsou ve srovnání s teplotní turbulencí tak velké jako v případě azimutu.

Tabulka 9.9: *Diference mezi referenčním prostředím a jednotlivým typem deště*

		Elipticita (deg)		Azimut (deg)	
		Naměřená	Rozdíl	Naměřená	Rozdíl
Hrubý déšť	100%	2,30	0,03	8,07	0,25
	50%	2,17	-0,10	8,03	0,21
Jemný déšť	100%	3,19	0,92	7,98	0,16
	50%	1,84	-0,43	8,34	0,52
Mrholení	100%	2,13	-0,14	8,05	0,23
	50%	2,33	0,06	8,05	0,23

Protože jednotlivé střední hodnoty při použití různých modulací se liší, bude proveden test, zdali lze jednotlivé hodnoty považovat za statisticky významně rozdílné či nikoliv. Pokud mezi daty nebude významný statistický rozdíl, další hypotézy budou opět provedeny, tak jako u turbulencí, pro jednu modulaci, protože by byly výsledky závěrů testů stejné.

Nejdříve je provedeno testování normality dat elipticity a azimutu dle modulací pro výběr statistického testu.

Test normality dat

H_0 : Data pochází z normálního rozdělení

$H_A : !H_0$

Použitý test: Kolmogorov-Smirnov test

Tabulka 9.10: *Tabulka p-hodnot testování normality dat pro parametr elipticity*

		p-hodnota							
		QPSK	$\pi/4$ DQPSK	8PSK	16PSK	4QAM	16QAM	32QAM	64QAM
Hrubý déšť	50%	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02	0,00	0,01	0,01
	100%	0,01	0,00	0,01	0,03	0,01	0,01	0,04	0,09
Jemný déšť	50%	0,65	0,09	0,45	0,56	0,65	0,26	0,33	0,09
	100%	0,05	0,06	0,14	0,00	0,01	0,57	0,09	0,69
Mrholení	50%	0,04	0,39	0,30	0,27	0,75	0,32	0,78	0,03
	100%	0,40	0,74	0,16	0,31	0,48	0,43	0,11	0,69

Rozhodnutí: Na základě p-hodnot výše, u řádků, ve kterém je zamítnuta alespoň jedna nulová hypotéza (označena červeně) bude použit Kruskal-Wallisův test a pro řádky bez zamítnuté nulové hypotézy bude použit test ANOVA.

Tabulka 9.11: *Tabulka p-hodnot testování normality dat pro parametr azimutu*

		p-hodnoty							
		QPSK	$\pi/4$ DQPSK	8PSK	16PSK	4QAM	16QAM	32QAM	64QAM
Hrubý déšť	50%	0,07	0,49	0,10	0,27	0,13	0,22	0,19	0,20
	100%	0,42	0,47	0,62	0,33	0,82	0,08	0,11	0,86
Jemný déšť	50%	0,98	0,53	0,28	0,28	0,99	0,42	0,50	0,77
	100%	0,35	0,43	0,35	0,18	0,56	0,39	0,84	0,78
Mrholení	50%	0,81	0,82	0,36	0,89	0,60	0,55	0,28	0,57
	100%	0,68	0,73	0,89	0,78	0,46	0,61	0,84	0,51

Rozhodnutí: Na základě p-hodnot nedochází k zamítnutí nulové hypotézy ani v jednom případě. Pro všechny možnosti bude použit test ANOVA.

9.4.1 Testování hypotéz

První hypotézou je ověření statisticky významného rozdílu mezi použitými modulacemi.

Hypotéza

H_0 : Mezi daty dle použité modulace není statisticky významný rozdíl

$H_A : !H_0$

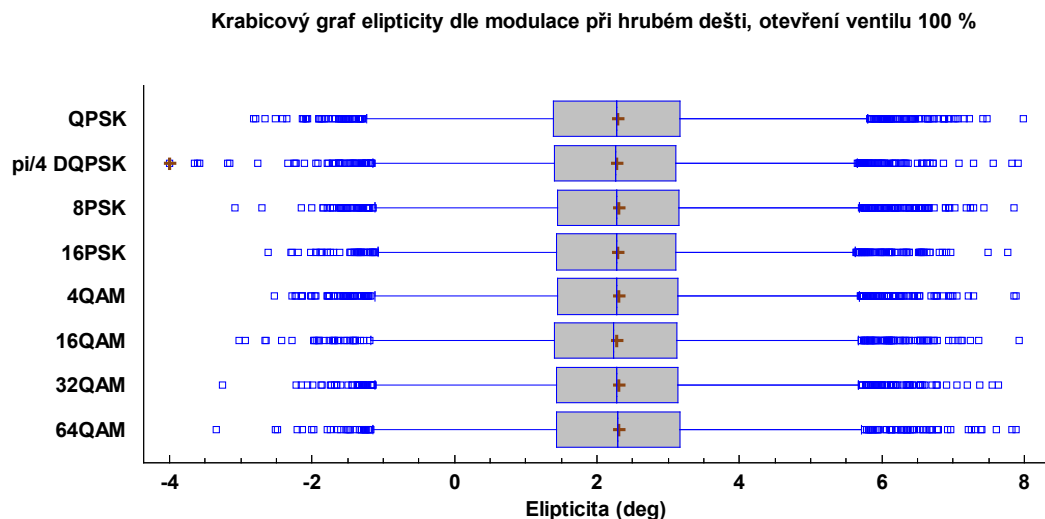
Použitý test: ANOVA a Kruskal-Wallis (pro případy elipticity hrubého deště, jemného deště 100 % a mrholení 50 %)

Tabulka 9.12: *P-hodnoty testů ANOVA a Kruskal-Wallis*

	p-hodnota					
	Hrubý déšť		Jemný déšť		Mrholení	
	100%	50%	100%	50%	100%	50%
Elipticita	0,28	0,10	0,08	0,16	0,33	0,10
Azimut	0,21	0,62	0,33	0,52	0,17	0,19

Rozhodnutí: Na základě p-hodnot (všechny p-hodnoty $> 0,05$) nezamítáme na hladině spolehlivosti 95 % nulovou hypotézu. Mezi daty není statisticky významný rozdíl, proto pro další

testování mohou být použity data z jedné modulace a u ostatních budou platit stejné závěry. Krabicové grafy všech modulací jsou uvedeny v elektronické příloze. Níže je zobrazen případ pro hrubý déšť.



Obrázek 9.16: *Krabicový graf parametru elipticity všech modulací při vlivu hrubého deště*

Níže budou následovat hypotézy, liší-li se hodnoty dle typu deště a dále pro každý déšť jestli je statisticky významný rozdíl při změně průtoku trysky. Protože nebyla zamítnuta nulová hypotéza o významném rozdílu mezi modulacemi, bude tak jako u turbulencí vybrána pro testování modulace QPSK.

Hypotéza

H_0 : Vliv použitého deště nemá vliv na změnu parametrů elipticity a azimutu

$H_A : !H_0$

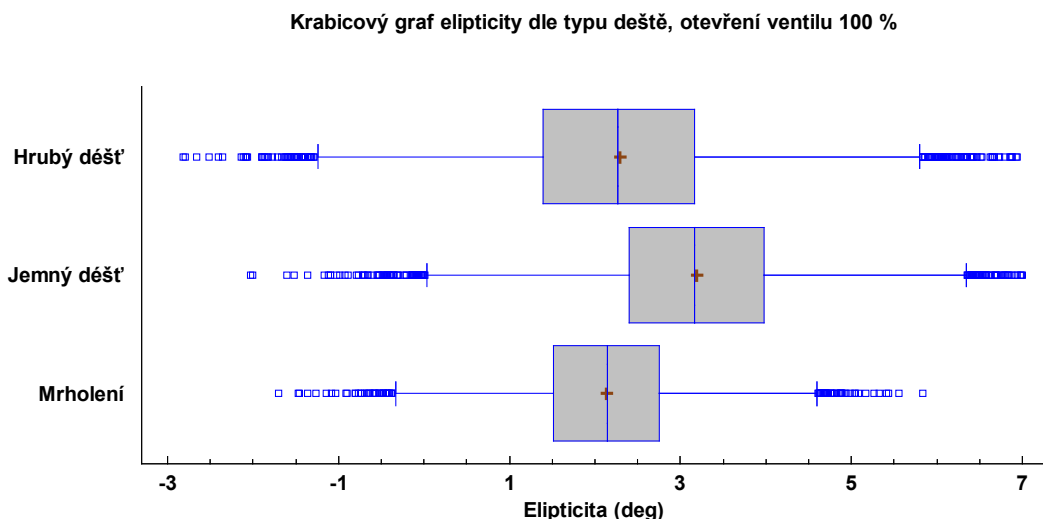
Použitý test: Kruskal-Wallis pro elipticitu a ANOVA pro testování azimutu (dle předchozího testování normality dat)

Tabulka 9.13: *P-hodnoty testů ANOVA a Kruskal-Wallis*

Otevření ventilu	100%	50%
Elipticita	0	0
Azimut	0,003	0

Rozhodnutí: Na základě p-hodnot zamítáme ve všech případech nulovou hypotézu, typ deště má vliv na změnu parametrů elipticity a azimutu na hladině spolehlivosti 95 %. U elipticity jsou statistickými rozdílnými skupinami všechny skupiny. U azimutu v případě otevření ventilu na 100 % je rozdíl pouze mezi skupinou hrubým - jemný déšť. U otevření ventilu na 50 % jsou statisticky rozdílné skupiny hrubý – jemný déšť a jemný déšť – mrholení.

Na obrázku 9.17 je krabicový graf pro jednotlivé deště na vliv parametru elipticity. Je zřejmý rozdíl mezi jednotlivými typy deště, kdy především jemný déšť zapříčinil největší změnu střední hodnoty. Dále je zřejmý vliv rozptylu hodnot dle typu deště.



Obrázek 9.17: *Krabicový graf elipticity dle použitého typu deště*

Hypotéza

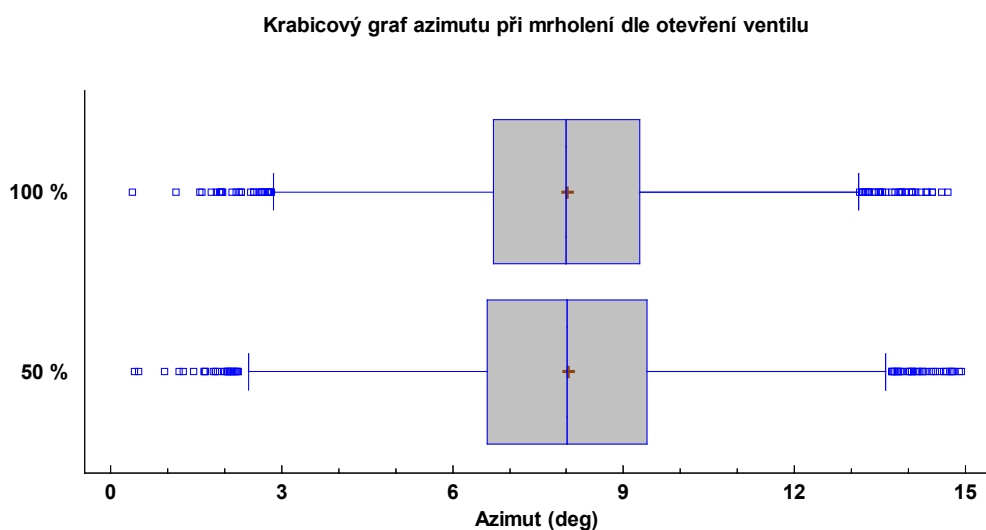
H0: Vliv množství průtoku nemá vliv na změnu parametrů elipticity a azimutu

HA : !H0

Použitý test: Mann-Whitney pro elipticitu při hrubém dešti a mrholení, t-test pro testování azimutu a elipticity v případě jemného deště

	p-hodnota		
	Hrubý déšť	Jemný déšť	Mrholení
Elipticita	0	0	0
Azimut	0,046	0	0,63

Rozhodnutí: Dle výsledných p-hodnot zamítáme nulovou hypotézu na hladině spolehlivosti 95 %, kromě situace při mrholení, kdy nedošlo k významnému statistickému rozdílu u parametru azimutu (viz obrázek 9.18).



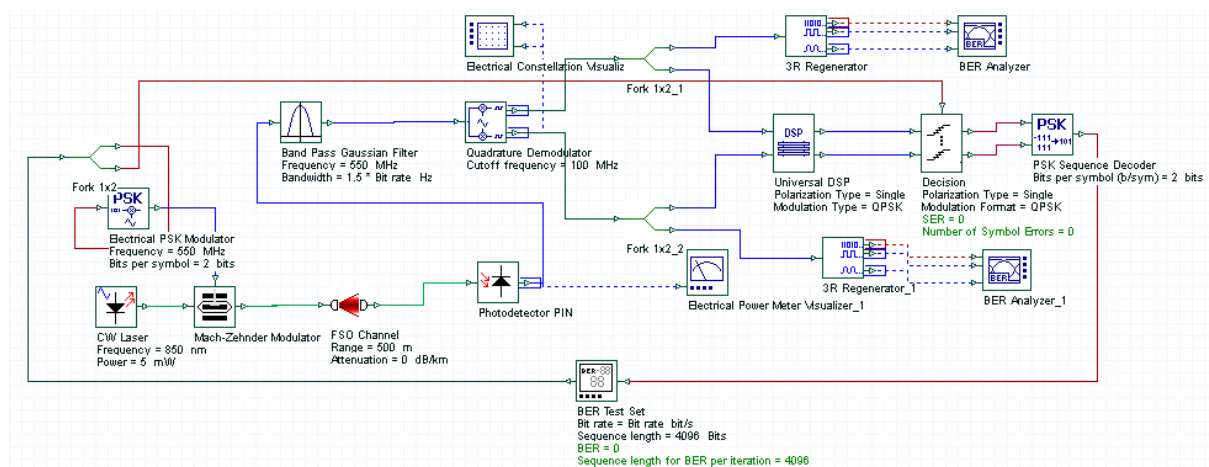
Obrázek 9.18: *Krabicový graf azimutu pro mrholení dle otevřeného ventilu*

10 Simulace v programu Optisystem

Za pomoci programu Optisystem ve verzi 14 jsou nasimulovány modulační schémata PSK (QPSK, 8PSK a 16PSK) a QAM (16QAM, 32QAM a 64QAM). Na těchto modulacích jsou simulovány vlivy změn atmosférického prostředí pomocí celkového útlumu atmosféry a dále za pomoci parametru scintilace (strukturní parametr indexu lomu), který určuje velikost turbulencí vyskytujících se v přenosovém kanálu. Pro konstantní délku přenosové trasy (500 m) je měněn parametr útlumu atmosféry (0 až 60 dB) a také velikost turbulence (malá $C_n^2 = 10^{-17}$ a velká $C_n^2 = 10^{-12}$). Z těchto změn je vytvořen graf symbolové chybovosti v závislosti na zvětšujícím se útlumu a při změně velikosti turbulence. Také jsou zachyceny konstelační diagramy daných modulací a diagramy oka.

Na následujícím obrázku 10.1 je schéma vytvořené simulace pro testování PSK modulací. Pro modulační schéma QAM je zapojení stejné, akorát je změněn PSK modulátor a dekodér za QAM modulátor a dekodér. Jednotlivé typy modulační schémata jsou pak nastaveny pomocí parametru určující počet bitů na symbol. Typ modulační schéma se také musí nastavit v bloku Decision. Z tohoto bloku je odečítán parametr SER (Symbol Error Ratio), který určuje podíl počtu chybných symbolů vůči počtu přenesených symbolů. V bloku FSO channel jsou nastaveny hodnoty útlumu atmosféry (dBkm^{-1}) a scintilace.

Simulace je provedena, tak jako reálné měření, pro dvě vlnové délky 650 a 850 nm. Hodnota přenosové rychlosti je nastavena na hodnotu 100 Mbps, počet vzorků na symbol 16 a délka datové sekvence 4096 bitů. Výkon komponenty CW Laser byl nastaven na hodnotu 5 mW.



Obrázek 10.1: Schéma simulace PSK modulace

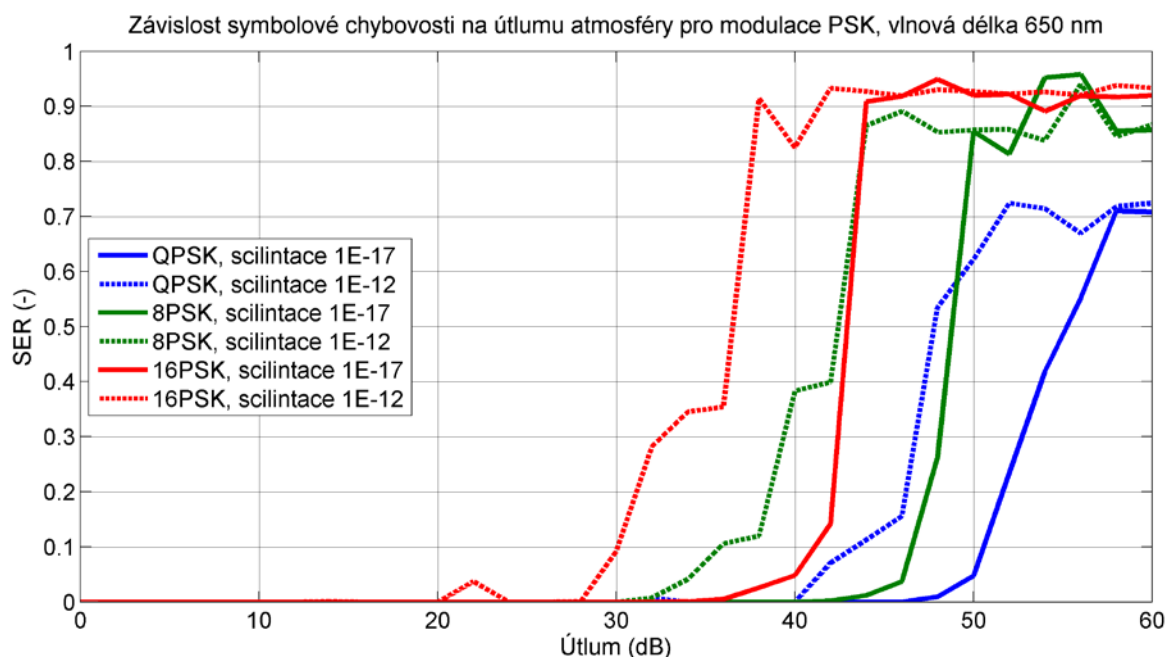
Dá se předpokládat, že nejdolnější modulační schémata by měla být modulační schémata s malým počtem stavů, u kterých je menší pravděpodobnost záměny symbolů vlivem většího rozhodovacího pole, kdežto u modulačních schémat s větším počtem stavů jsou jednotlivé symboly blízko sobě, a tak je větší riziko, že se vysílaný symbol vlivem nepříznivých podmínek dostane do rozhodovacího pole vedlejšího symbolu.

10.1 PSK modulační schémata

V následujících dvou podkapitolách jsou výsledky simulace pro modulační schémata QPSK, 8PSK a 16PSK dle použité vlnové délky zdroje záření.

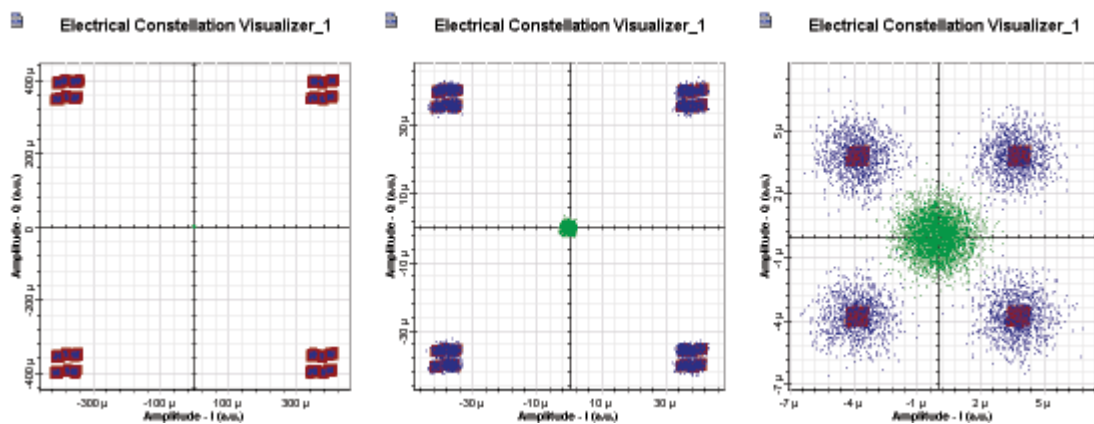
10.1.1 Vlnová délka 650 nm

Na obrázku 10.2 je zobrazen výsledný graf srovnávající výsledky simulace pro vlnovou délku 650 nm. Každá simulace je zobrazena dvakrát dle úrovně turbulence popsané scintilací. Z grafu je zřejmé, že se potvrdil předpoklad, kdy nejlepšího výsledku dosahuje modulace QPSK. U této modulace začíná růst počet chybně přenesených symbolů až od hodnoty útlumu 40 až 50 dB dle velikosti turbulence. Hned za ní se řadí modulace 8PSK a až jako třetí je modulace 16PSK, která má největší počet stavů. Turbulence s větší hodnotou jsou zobrazeny čárkovaně. Lze vidět, že míra turbulence hraje také důležitou roli ve výsledné odolnosti dané modulace. Za zmínku také stojí fakt, že s rostoucí turbulencí se zhorší odolnost za hranici složitější modulace při menší turbulenci.

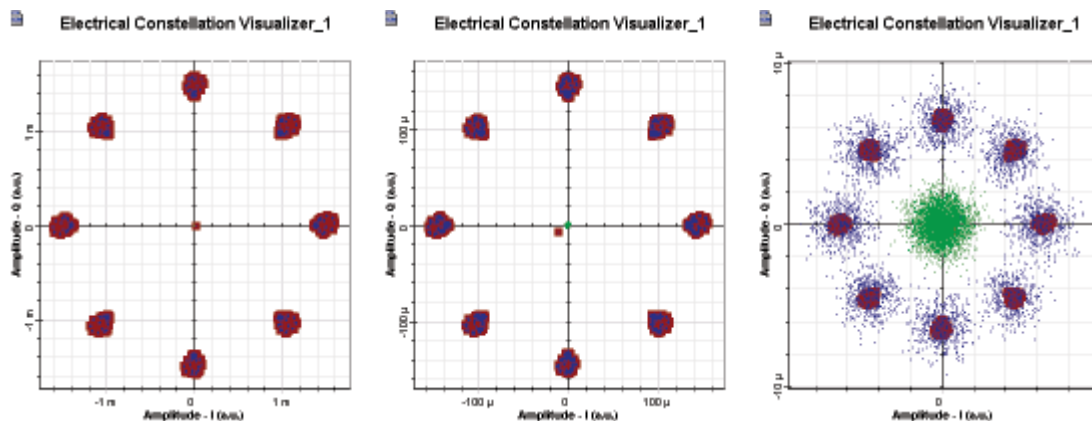


Obrázek 10.2: Graf výsledku simulace PSK modulací při vlnové délce 650 nm

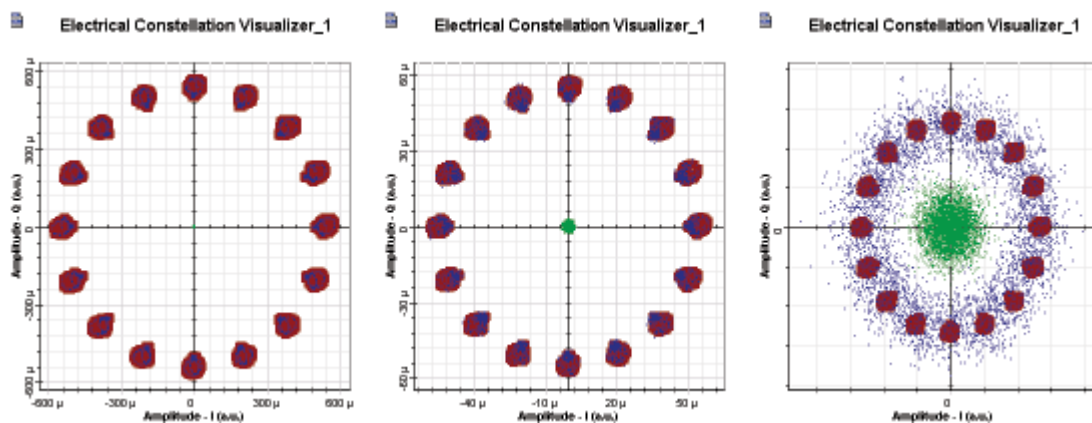
Nyní budou níže zobrazeny konstelační diagramy pro určité útlumy. Vzhledem k tomu, že konstelačních grafů bylo zachyceno mnoho, budou zde uvedeny konstelační diagramy pro 0, 20 a 40 dB pro jednu hodnotu scintilace. Zbytek grafů jsou součástí přílohy.



Obrázek 10.3: Konstelační diagramy modulace QPSK, scintilace 10^{-12} , útlumy 0, 20 a 40 dB

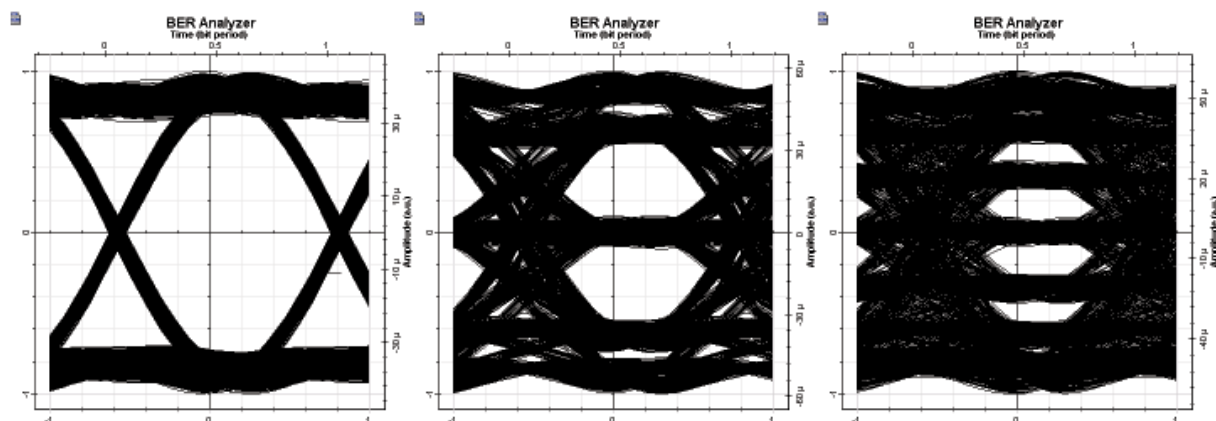


Obrázek 10.4: Konstelační diagramy modulace 8PSK, scintilace 10^{-12} , útlumy 0,20 a 40 dB



Obrázek 10.5: Konstelační diagramy modulace 16PSK, scintilace 10^{-12} , útlumy 0,20 a 40 dB

Z výše uvedených konstelačních diagramů je patrné jak vlivem útlumu a turbulence dochází ke zhoršování kvality modulace a také se začíná objevovat šum, což je patrné u diagramů při 40 dB útlumu.

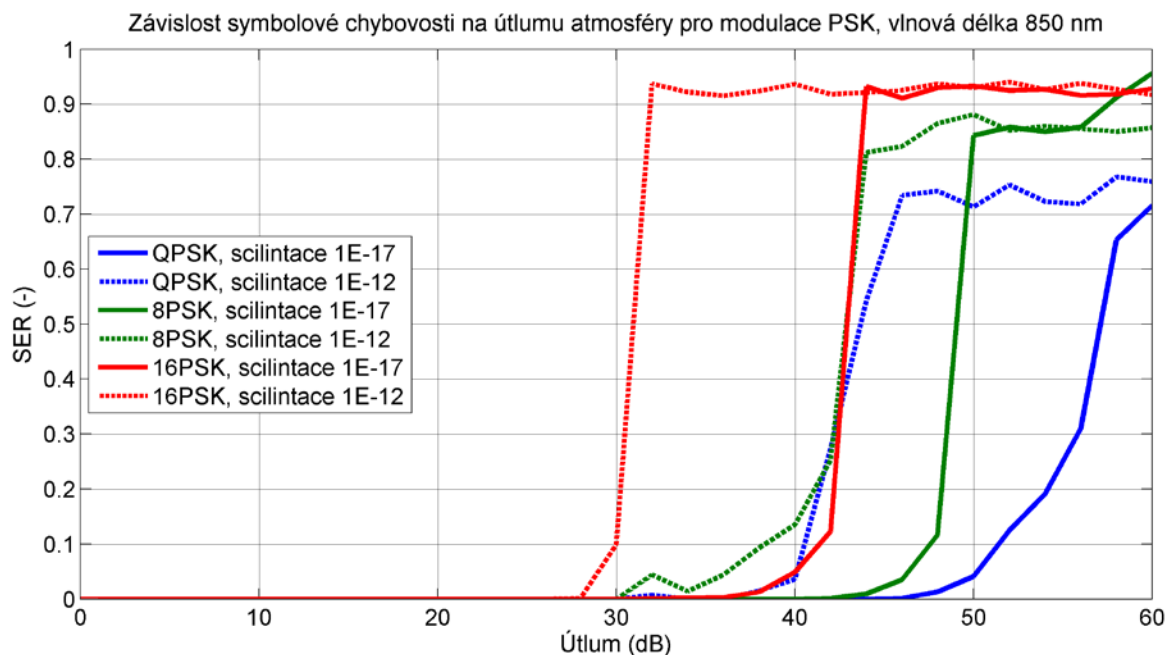


Obrázek 10.6: Diagramy oka modulace QPSK, 8PSK a 16PSK pro útlum 20 dB a scintilaci 10^{-12}

Z diagramu oka je vidět, že u modulace s menším počtem stavů je oko daleko otevřenější, kdežto u složitější modulace dochází k přivírání oka. Jednotlivé stavy jsou tak čím dál méně rozlišitelné a dochází k chybným vyhodnocením.

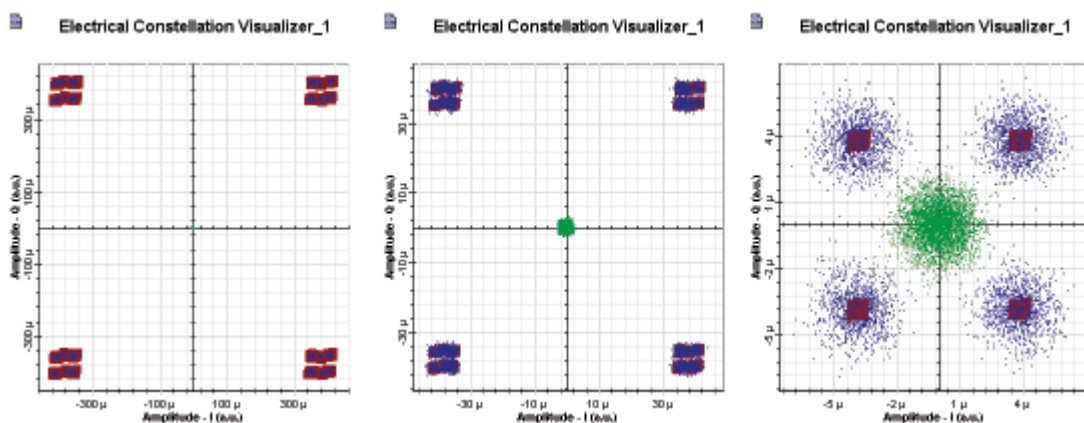
10.1.2 Vlnová délka 850 nm

Na obrázku 10.7 je zobrazen výsledný graf srovnávající výsledky simulace pro vlnovou délku 850 nm a rozdělení dle úrovně turbulence popsané scintilací. Oproti vlnové délce 650 nm dochází k většímu rozdílu při změně turbulence. U vlnové délky 650 nm jsou průběhy blíže u sebe, kdežto zde dochází k většímu rozestupu. Tak jako v předchozím případě dosahuje nejlepších výsledků modulace QPSK, dále 8PSK a následně 16PSK.

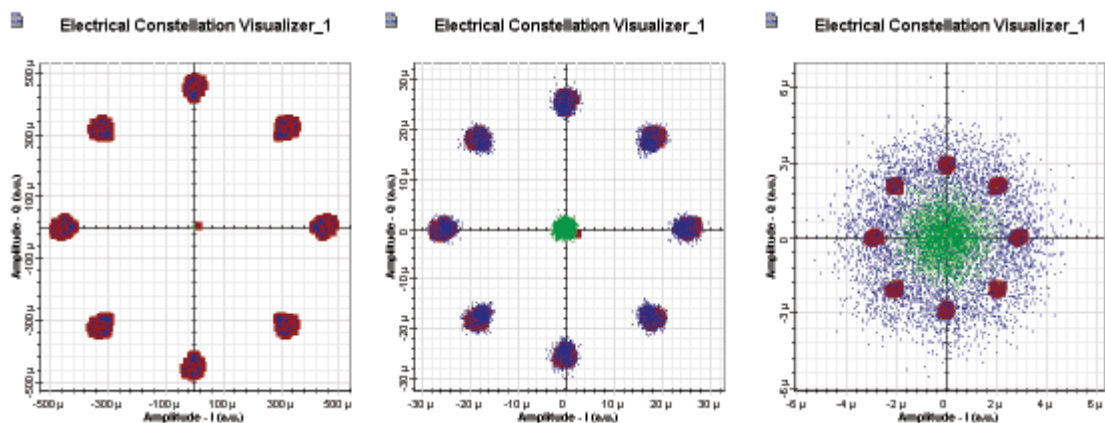


Obrázek 10.7: Graf výsledku simulace PSK modulací při vlnové délce 850 nm

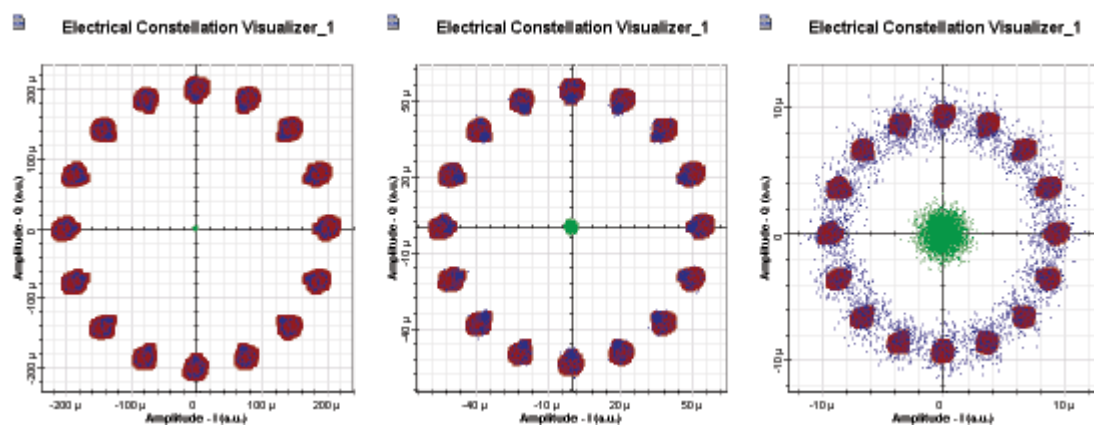
Níže jsou opět uvedeny konstelační diagramy daných PSK modulací dle útlumu atmosféry. Lze vidět, jak s rostoucím útlumem dochází k většímu zašumění diagramu, což vede ke zhoršení parametrů modulace.



Obrázek 10.8: Konstelační diagramy modulace QPSK, scintilace 10^{-12} , útlumy 0, 20 a 40 dB

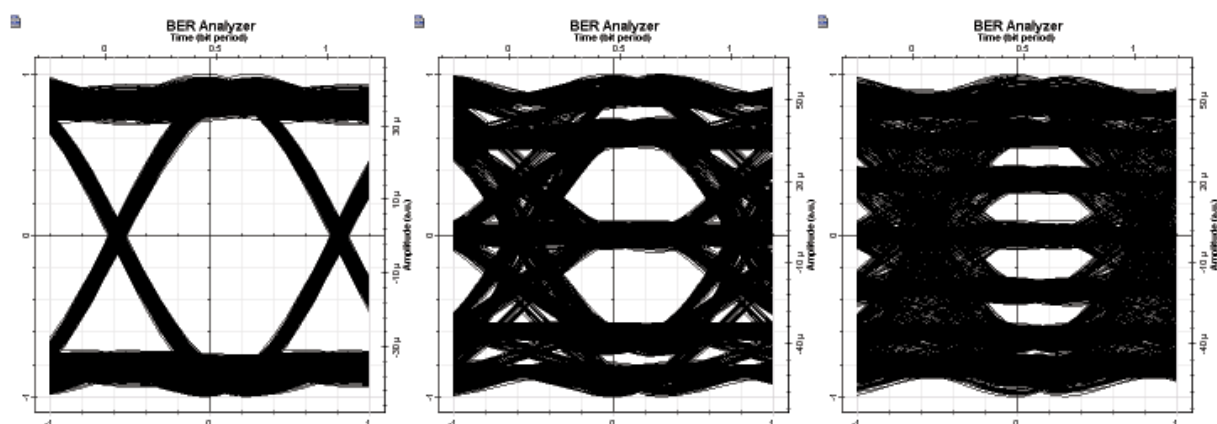


Obrázek 10.9: Konstelační diagramy modulační 8PSK, scintilace 10^{-12} , útlumy 0,20 a 40 dB



Obrázek 10.10: Konstelační diagramy modulační 16PSK, scintilace 10^{-12} , útlumy 0,20 a 40 dB

Na obrázku níže jsou zobrazeny diagramy oka modulací. Opět je viditelné, že u modulační QPSK je k dispozici velké rozvěšení oka, a tak je nejméně pravděpodobná záměna symbolů, na rozdíl od modulací 8PSK a 16PSK, u kterých jsou symboly blízko sebe.



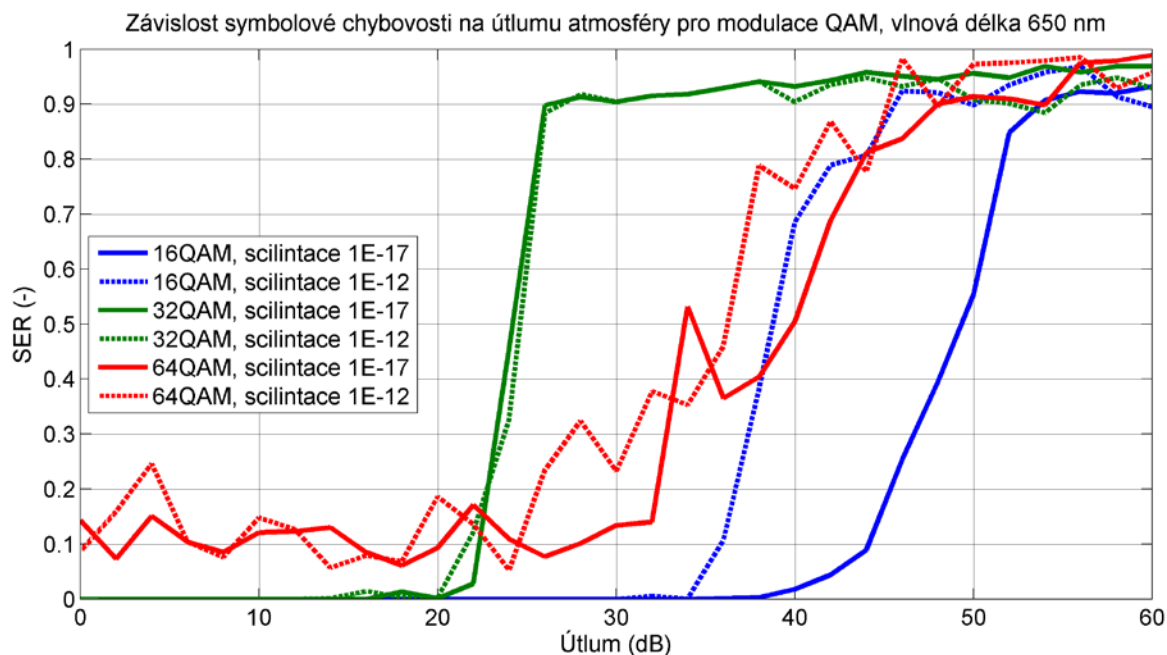
Obrázek 10.11: Diagramy oka modulační QPSK, 8PSK a 16PSK pro útlum 20 dB a scintilaci 10^{-12}

10.2 QAM modulační

V následujících dvou podkapitolách jsou výsledky simulace pro modulační 16QAM, 32QAM a 64QAM dle použité vlnové délky zdroje záření.

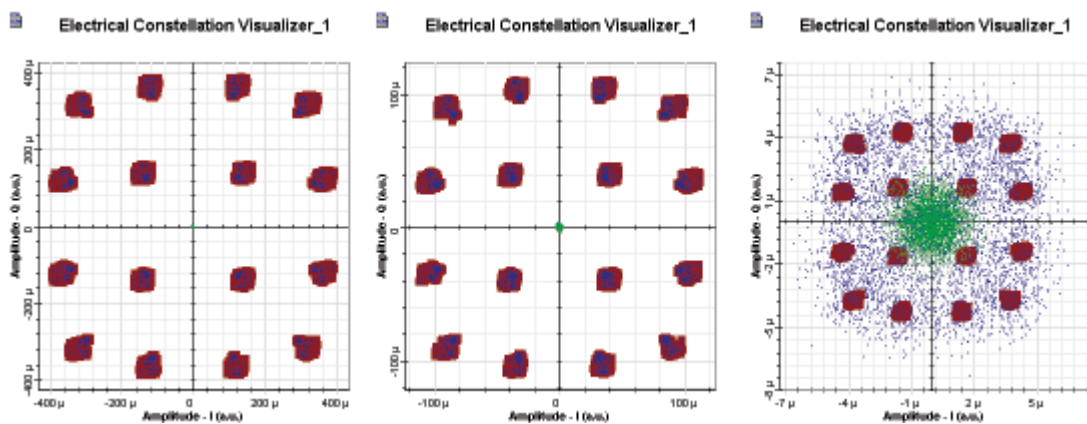
10.2.1 Vlnová délka 650 nm

Na obrázku 10.12 je graf zahrnující srovnání QAM modulací v závislosti parametru SER na útlumu atmosféry a velikosti turbulencí. Vidíme, že modulace 16QAM se dá srovnat s výše uvedenými modulacemi 8PSK či 16PSK, kdežto následující dvě modulace 32QAM a 64QAM už jsou poměrně náchylné vznikající atmosférické rušivé vlivy. Parametr SER u nich začíná růst ve srovnání s modulacemi PSK dříve a u modulace 64QAM dochází k chybným symbolům už od počátku. Tato modulace je velmi citlivá na stavu atmosféry. Je to dáno také tím, že jednotlivé symboly jsou blízko u sebe, a tak je velmi pravděpodobná záměna symbolu za jiný.

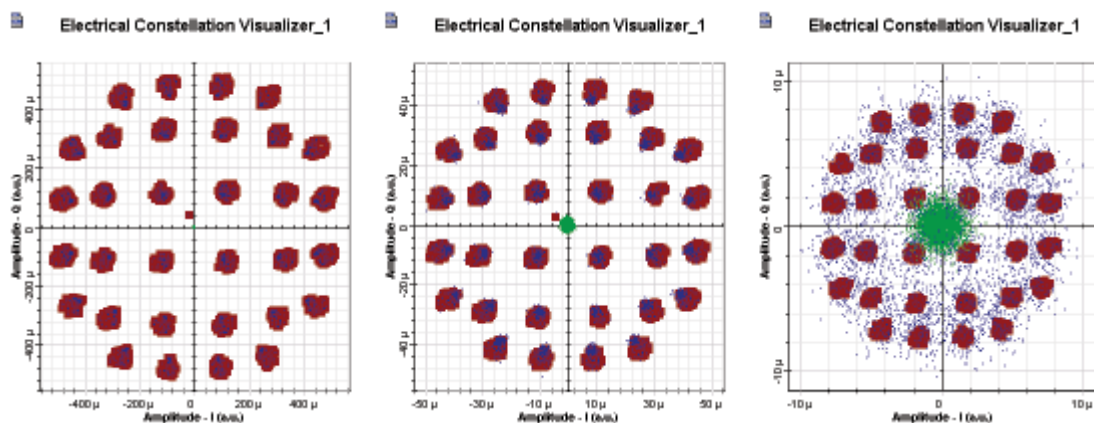


Obrázek 10.12: Graf výsledku simulace QAM modulací při vlnové délce 650 nm

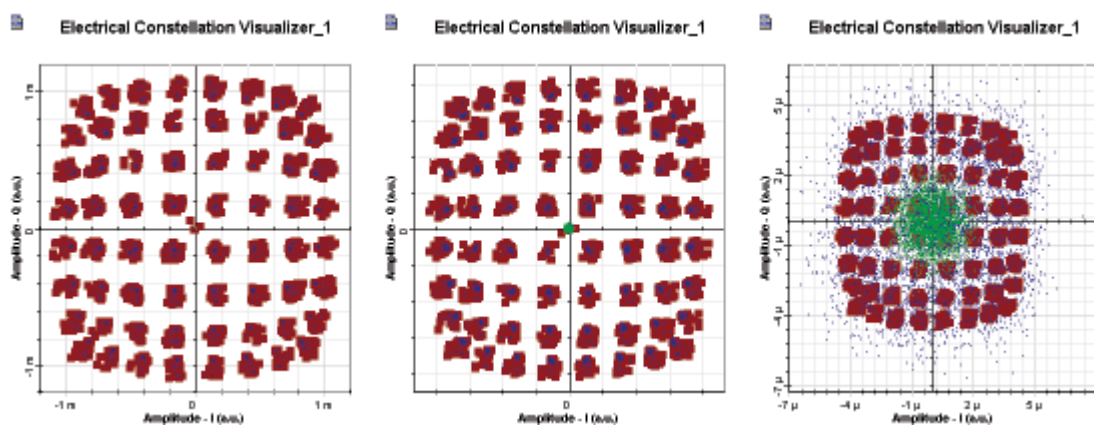
Na níže uvedených obrázcích jsou zachyceny konstelační diagramy daných QAM modulací dle útlumu atmosféry. Lze vidět, jak s rostoucím útlumem dochází k většímu zašumění diagramu a u modulace 64QAM začíná docházet k překrývání jednotlivých symbolů, což značí vysokou chybovost při přenosu dat.



Obrázek 10.13: Konstelační diagramy modulace 16QAM, scintilace 10^{-12} , útlumy 0, 20 a 40 dB

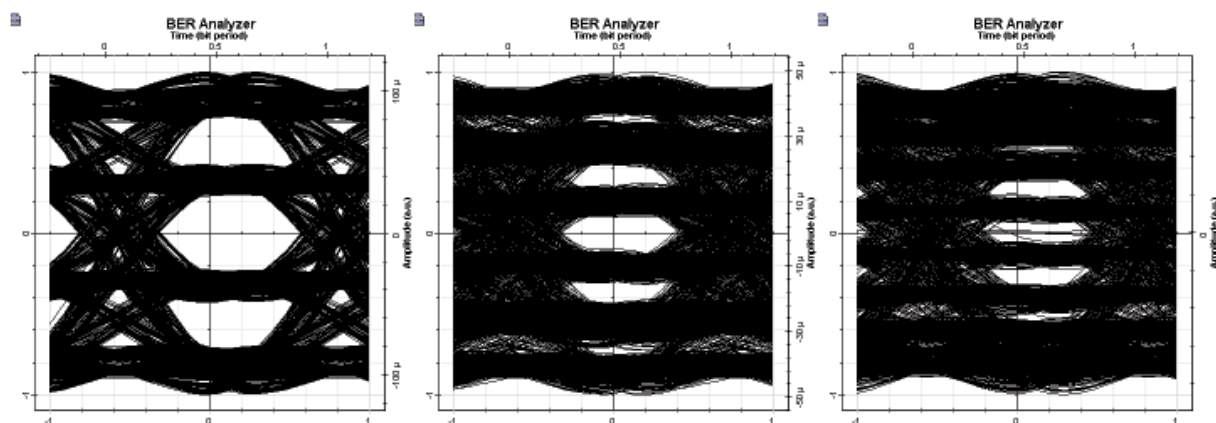


Obrázek 10.14: Konstelační diagramy modulace 32QAM, scintilace 10^{-12} , útlumy 0,20 a 40 dB



Obrázek 10.15: Konstelační diagramy modulace 64QAM, scintilace 10^{-12} , útlumy 0,20 a 40 dB

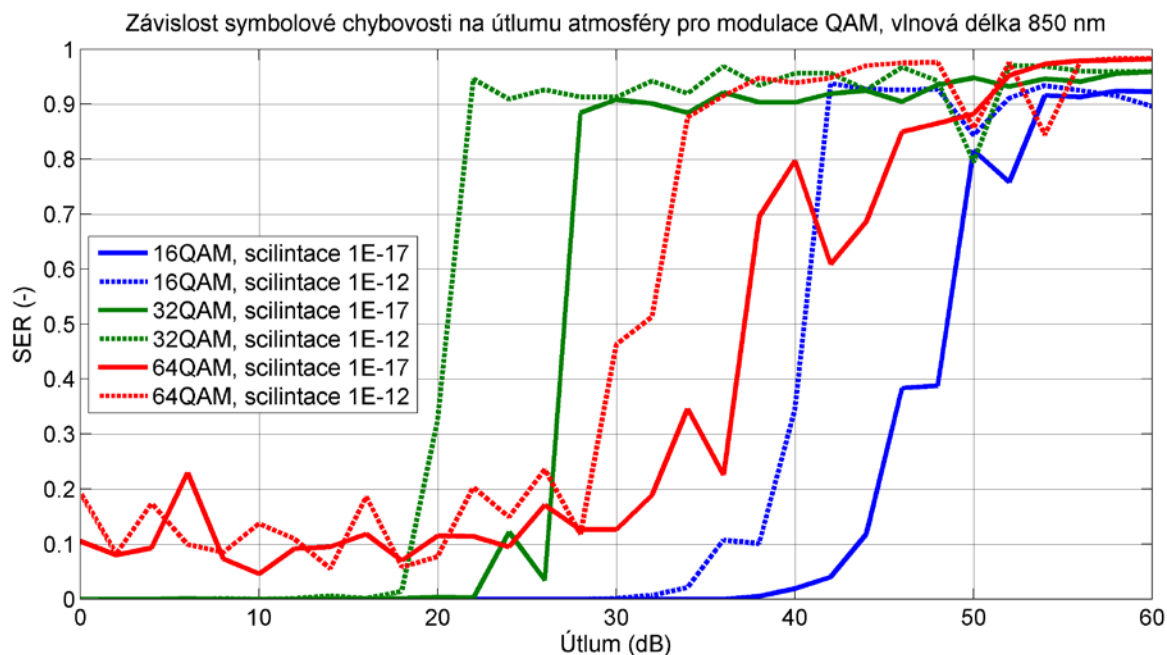
Na obrázku 10.16 jsou pro srovnání zobrazeny diagramy oka simulovaných typů QAM modulací. Je opět patrné, že čím méně stavů daná modulace má, tím větší prostor pro správný rozhodovací okamžik vyhodnocení symbolu. Například modulace 64QAM má diagram oka už poměrně dost přivřený, což je vidět i z grafu průběhů parametru SER, že u této modulace dochází k chybným vyhodnocením symbolů hned zpočátku.



Obrázek 10.16: Diagramy oka modulace 16QAM, 32QAM a 64QAM pro útlum 20 dB a scintilaci 10^{-12}

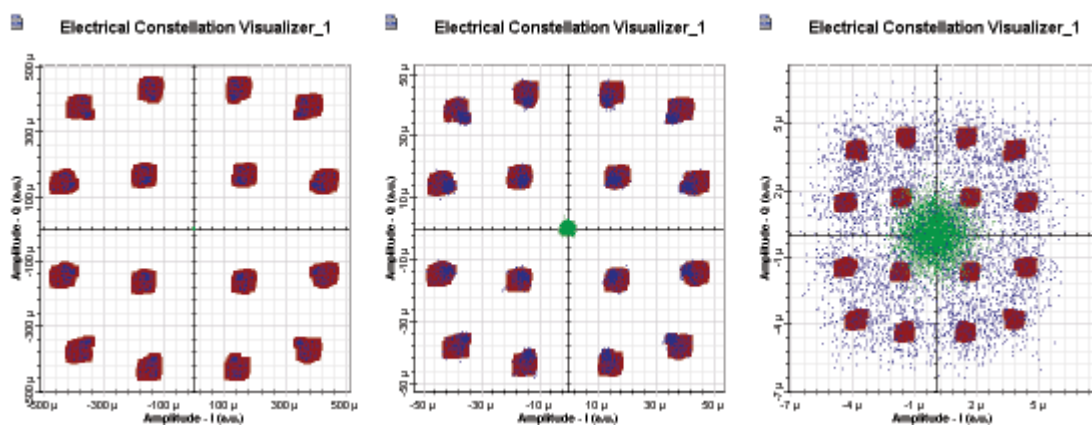
10.2.2 Vlnová délka 850 nm

V grafu na obrázku 10.17 je zobrazen průběh parametru SER daných modulací v závislosti na útlumu s použitou vlnovou délkou zdroje 850 nm. V porovnání s nižší vlnovou délkou zde nedochází k nikterak větším rozdílům, jako u modulací PSK, ale vesměs zůstávají průběhy podobné. U modulací 32QAM a 64QAM došlo k většímu rozestupu křivek vlivem rozdílné turbulence. U modulace 64QAM opět začíná kolísat symbolová chybovost už od počátku.

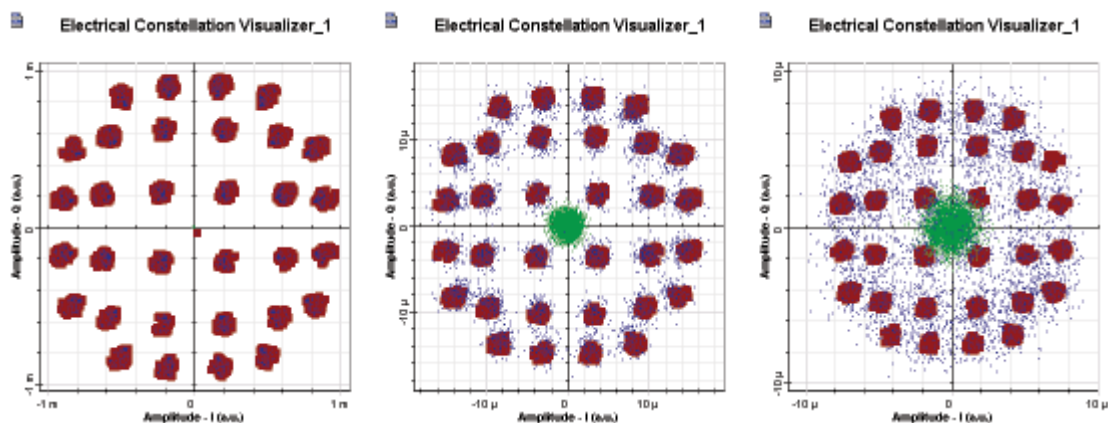


Obrázek 10.17: Graf výsledku simulace QAM modulací při vlnové délce 850 nm

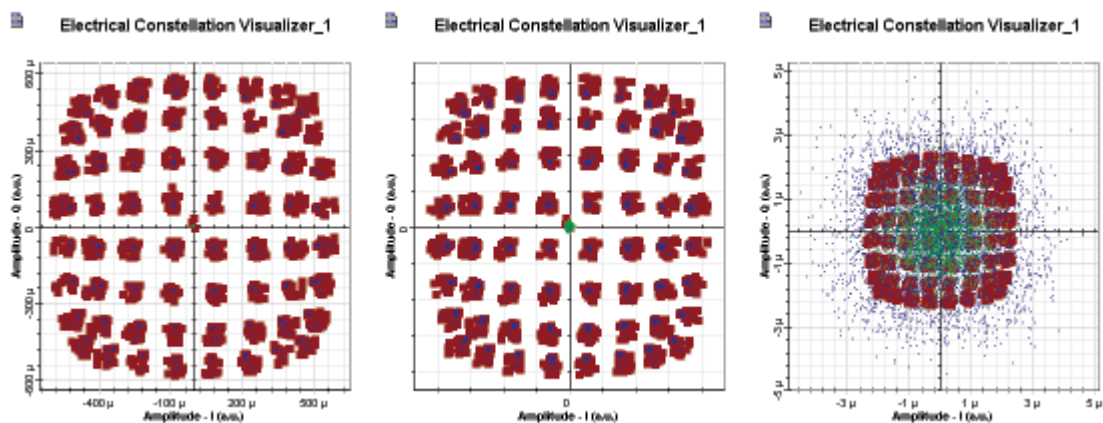
Na níže uvedených obrázcích jsou zachyceny konstelační diagramy daných QAM modulací dle útlumu atmosféry. S rostoucím útlumem opět dochází k většímu zašumění diagramu a u modulace 64QAM dochází k překrytí určitých symbolů do jednoho.



Obrázek 10.18: Konstelační diagramy modulace 16QAM, scintance 10^{-12} , útlumy 0, 20 a 40 dB

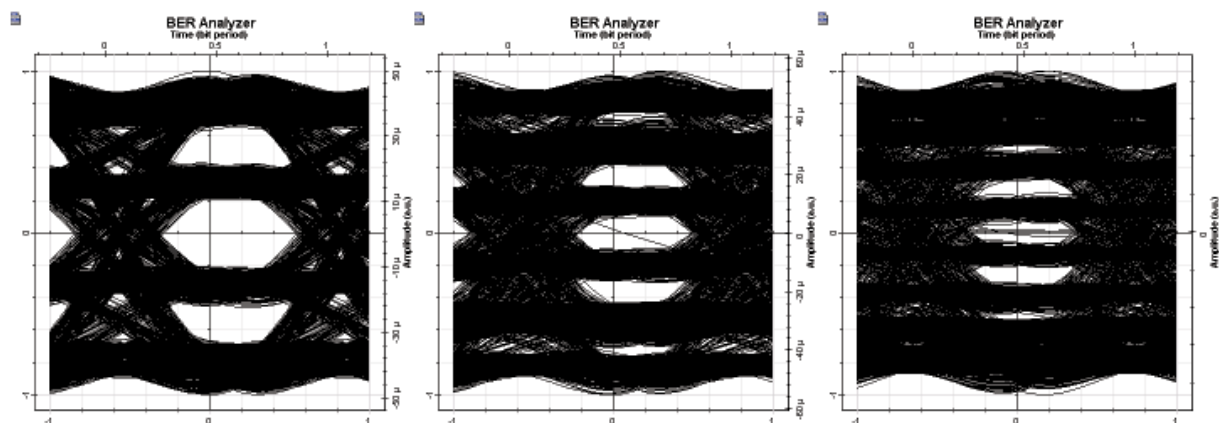


Obrázek 10.19: Konstelační diagramy modulace 32QAM, scintilace 10^{-12} , útlumy 0,20 a 40 dB



Obrázek 10.20: Konstelační diagramy modulace 64QAM, scintilace 10^{-12} , útlumy 0,20 a 40 dB

Na obrázku 10.21 jsou zobrazeny diagramy oka QAM modulací, ze kterých je patrná složitost vícecestových modulací najít při zhoršených podmínkách atmosféry správný rozhodovací okamžik, protože dochází k poměrně velkému přivírání oka u jednotlivých stavů. Proto čím méně stavů daná modulace má, tím větší rozevření oka a tím menší pravděpodobnost záměny symbolu.



Obrázek 10.21: Diagramy oka modulace 16QAM, 32QAM a 64QAM pro útlum 20 dB a scintilaci 10^{-12}

Závěr

Práce se především zabývá měřením vlivů atmosférických jevů na modulační formát pro optický svazek. Jsou měřeny pokročilé modulační formáty PSK (QPSK, $\pi/4$ DQPSK, 8PSK a 16PSK) a QAM (4QAM, 16QAM, 32QAM a 64QAM). Proces modulace i demodulace je zajištěno pomocí zařízení USRP, které je řízeno aplikacemi vytvořené v prostředí Labview za pomoci knihovny Radio modulation toolkit. Kromě měření vlivu na modulační formát je také měřen vliv na změnu polarizačního stavu optického svazku.

V první části práce je popsána teorie zabývající se úvodem do atmosférických optických spojů, kde jsou uvedeny základní výhody a nevýhody této technologie. Další kapitoly se věnují popisem optického svazku, parametry pro vyhodnocení kvality optického spoje, používané modulace a také popisem polarizace. Velkou kapitolou je část popisující atmosféru. Atmosféra je nehomogenní a nestacionární prostředí, ve které vznikají jevy zapříčiňující absorpci, rozptyl a fluktuaci indexu lomu. Tyto jevy zapříčiňují degradaci kvality optického svazku, a proto jsou jevy popsány. Také je v kapitole věnovaná část zabývající se vlivem počasí, které má za následek zvětšení útlumu a tím pádem u daného spoje dochází k jeho degradaci. Největším problémem v atmosférických optických systémech je mlha, která optickému záření vykazuje velký útlum. Mlha je popsána pomocí viditelnosti, od které se odvíjí, dle použitého modelu, její útlum.

V praktické části je nejprve věnovaná kapitola popisem laboratorního boxu pro tvorbu deště, který byl za účelem této práce a také dalšího pozdějšího testování sestaven. Jsou popsány součástky, které jsou nutné k provozu tohoto boxu a také byla pro ovládání boxu naprogramována aplikace v Labview, pro řízení ovládacího ventilu a snímání hodnoty průtoku a tlaku. K samotné tvorbě deště jsou využity průmyslové trysky s rozstříkem ve tvaru plného kužele, které jsou v praxi využívány například pro mytí průmyslových nádob. K dispozici je několik druhů trysek, které se liší ve velikosti rozprašovaných částic. Výrobce však tuto velikost nedefinuje a proto byl déšť definován pozorovatelem jako hrubý déšť, jemný déšť a mrholení. Na krátkou dobu byla k dispozici vysokorychlostní kamera, se kterou se podařilo zachytit déšť trysek, u které byl déšť definován jako mrholení. Pomocí zachyceného záznamu byly změřeny kapky, které dosahovaly průměrné velikosti 460 μm . Mrholení je definováno kapkami o rozměru menším než 0,5 mm, což daná tryska splňuje. Z časových důvodů zapůjčení této kamery nebylo možno změřit další trysky, a proto v dalších pracích věnované této problematice by bylo tímto řešením vhodné zjistit všechny trysky.

Další dvě kapitoly se zabývají praktickým měřením. První z nich je měření atmosférických vlivů na modulační formát. Tyto vlivy na modulační formát jsou posuzovány z hlediska modulační chybovosti MER (dB) a graficky pomocí konstelačního diagramu. V příloze jsou také uvedeny hodnoty a grafy k parametru EVM, který je s parametrem MER svázán, avšak jeho chování je inverzní (při zhoršení modulace roste parametr EVM vyjádřený v procentech). Měření bylo provedeno pro dvě vlnové délky 650 a 850 nm. Modulace byly testovány s atmosférickými jevy turbulence, deště a mlhy.

U turbulence bylo využito teplotních ventilátorů, které byly nasměrovány do vstupního ventilátoru na stěně laboratorního boxu, kterým tak proudil horký vzduch. Měření bylo rozděleno do šesti kroků a každý krok proveden pro tři úrovně otáček ventilátorů. Nejprve byl využit jeden zdroj turbulence. Byl testován také vliv umístění vzhledem k přijímači a vysílači. Nejhorších výsledků se dosahovalo v případě umístění zdroje turbulence u vysílače. Následně byl přidán druhý turbulentní

zdroj, který přinesl další zhoršení kvality modulace. V posledním korku byl přidán poslední třetí zdroj turbulence a na optický svazek tak působily turbulence v celé jeho délce, čím došlo k ještě většímu zhoršení modulační chybovosti. Z naměřených hodnot bylo provedeno testování hypotéz, jestli existuje statisticky významný rozdíl mezi klidným referenčním prostředím a turbulentemi, vliv umístění turbulentního zdroje a jejich počtu, a také vliv změny teploty. U všech těchto hypotéz došlo k závěru, že existují mezi těmito vlivy statisticky významné rozdíly. Jednotlivé výsledky jsou vždy popsány a také provedena post-hoc analýza lišících se skupin. Při srovnání modulací dle odolnosti vychází nejlépe skupina PSK, která dosahuje lepších výsledků než modulace typu QAM. Jako nejodolnější modulace vůči turbulentím se dle měření jeví $\pi/4$ DQPSK. Mezi ostatními PSK modulacemi a také modulací 4QAM však nejsou velké rozdíly. Obecně platí, že čím méně stavů daná modulace přenáší, tím více je odolná. Mezi nejhorší tak dle očekávání dopadly modulace 32QAM a 64QAM. Při použití vlnové délky 850 nm bylo ovlivnění turbulentemi větší než u vlnové délky 650 nm.

Dalším testovaným jevem byl dešť. Modulace byly testovány na již zmíněných třech typech deště a u každého deště bylo měření provedeno pro dvě úrovně průtoku. Nejhorších výsledků bylo zaznamenáno u deště definovaného jako jemný dešť. Hodnota MER klesla, dle vlnové délky, až na hodnoty 11 až 13 dB oproti referenčním hodnotám, které se pohybovaly okolo 24 dB. Nejmenšího ovlivnění nastalo u deště definovaného jako mrholení. Při zprůměrování hodnot ze všech typů deště se jevila jako nejodolnější modulace QPSK u vlnové délky 650 nm a 4QAM u vlnové délky 850 nm. Tak jako u turbulentí i zde lepších výsledků dosahovaly všeobecně PSK modulace. U QAM modulací docházelo k většímu ovlivnění. Jako nejhorší modulace byla dle očekávání 64QAM. Srovnání odolnosti dle použité vlnové délky vychází dle měření použití 850 nm, která dosahovala vyšších hodnot parametru MER.

Třetím atmosférickým testovaným jevem byla mlha. Mlha byla generována dvěma způsoby. Pomocí glycerinového mlhovače a sublimací suchého ledu. U použití mlhovače se mlha rozpadá velmi dlouhou dobu a proto byly zaznamenávány časové průběhy parametru MER po dobu třiceti minut. Z výsledných grafů je patrný rozdíl mezi modulacemi, které mají pouze čtyři stavy a u modulací, které mají stavů víc. U čtyřstavových modulací po klesnutí na minimum začaly pomalu růst bez výraznějšího rozptylu úrovně MER. Za to u složitějších modulací nastával při rozpadu mlhy velký rozptyl. U mlhy pomocí sublimace suchého ledu se mlha rozpadala výrazně rychleji. Byly zaznamenávány časové průběhy a měřena doba, po kterou modulaci trval nárůst hodnoty MER na původní hodnoty. Každá modulace byla změřena třikrát a z výsledných časů bylo provedeno testování hypotéz, zdali se časy liší dle použité modulace. Nulová hypotéza, že mezi časy není statisticky významný rozdíl, byla zamítnuta pouze v případě QAM modulací při vlnové délce 650 nm.

Druhou kapitolou zabývající se měřením je kapitola měření změny polarizace optického svazku působením atmosférických vlivů. Podobně jako u předchozího měření byla polarizace měřena při působení deště, mlhy a turbulentí, které byly rozděleny na mechanickou a teplotní.

U měření turbulentí bylo nejprve změřeno referenční prostředí. V tom se ukázalo, že vliv použití modulace není statisticky významný. Pro další měření tak byly vybrány modulace QPSK z řady PSK modulací a 16QAM z řady QAM modulací. Bylo provedeno měření pro tři úrovně rychlosti proudění mechanické turbulence a pro tři teplotní turbulence. Oba dva typy turbulentí mírně ovlivnili parametry modulace (změna elipticity a azimutu). U mechanických turbulentí dochází pouze k malým

odchylkám střední hodnoty oproti referenci, ale nastává větší rozptyl dat. Naopak větší důsledky má turbulence teplotní, u kterých docházelo k větším změnám střední hodnoty a také o mnoho většímu rozptylu. U mechanické turbulence platilo, že čím větší rychlost proudění tím větší ovlivnění. U teplotní turbulence záležela teplota na rychlosti otáček ventilátorů na stěnách boxu. Při malých otáčkách byla vysoká teplota, která postupně zvyšováním otáček klesala. Nejhorších výsledků bylo dosaženo při nejvyšší teplotě a tudíž nejmenšímu rychlosti proudění. Z toho vyplývá, že větší vliv má teplota oproti rychlosti mechanických turbulencí. Následně bylo provedeno testování hypotéz, jestli je mezi těmito naměřenými daty statisticky významný vliv. Nulová hypotéza, že nejsou, byla zamítnuta. Proto je možno říci, že turbulence mají vliv na chování polarizace. Také byl srovnán vliv dle použité modulace a mezi naměřenými daty nebyl statisticky významný vliv.

U mlhy bylo také využito dvou způsobů generace mlhy. V případě mlhy generované mlhovačem bylo srovnáno vliv dávky mlhy na změnu parametrů elipticity a azimutu. Oproti referenčním hodnotám se při vstříknutí mlhy hodnoty elipticity a azimutu změnili maximálně o $0,17^\circ$ a k mírnému nárůstu rozptylu. Platilo, že čím větší dávka mlhy tím větší difference vůči původní hodnotě bez mlhy. Hodnoty rozptylů se pohybovali na úrovni mechanických turbulencí. Největší ovlivnění je zapříčiněno turbulencí teplotní. U měření polarizace při mlze generované pomocí sublimace suchého ledu docházelo k úplnému přerušení vlivem velkého útlumu a docházelo tak oscilacím hodnot. Podobně jako u testování na vliv modulačního formátu byl měřen čas, po který se hodnoty ustálily na původní hodnotě. Z výsledných časů byla provedena hypotéza, zdali má vliv použité modulace na tuto dobu. Nulová hypotéza, že mezi časy neexistuje statisticky významný rozdíl, nebyla zamítnuta.

V případě působení deště byly změny hodnot elipticity a azimutu ovlivněny nejvíce. Hodnoty elipticity byly ovlivněny srovnatelně jako v případě u teplotní turbulence, avšak v případě azimutu docházelo ke změnám mnohem větším. Byly změřeny všechny modulace, ale dle výsledku testování hypotézy o statisticky významném rozdílu došlo k nezamítnutí hypotézy. Použitá modulace nemá statisticky významný vliv. Dále byly provedeny hypotézy o vlivu použitého deště a množství průtoku. U obou hypotéz je závěr, že mezi těmito vlivy existuje statisticky významný rozdíl.

Poslední kapitola je věnována simulacím v programu Optisystem. Bylo simulováno šest modulací a to QPSK, 8PSK, 16PSK, 16QAM, 32QAM a 64QAM. Simulace byla provedena pro dvě vlnové délky 650 a 850 nm a pro dvě hodnoty strukturního parametru indexu lomu. Modulace byly srovnávány vůči symbolové chybovosti v závislosti na útlumu atmosféry při konstantní délce trasy. Byla nastavena trasa 500 m a byl zvětšován útlum. Při dosažení určitého útlumu začal u daných modulací nárůst symbolové chybovosti. Výsledky simulace potvrdily předpoklad, že čím složitější modulace, tím je daná modulace náchylnější na atmosférické jevy, protože u většího počtu symbolů je pravděpodobnější, že se dané symboly začnou překrývat, což se také ukázalo na konstelačních diagramech. Dle simulací se také ukázalo, že kromě útlumu závisí také turbulence, které byly simulovány pomocí změny strukturního parametru indexu lomu. Čím větší turbulence, tím rychleji začínala stoupat symbolová chybovost.

Při celkovém zhodnocení odolnosti typu modulace vůči atmosférickým vlivům vyšly, dle měření, jednoznačně ve prospěch PSK modulací, které byly ovlivněny méně než modulace typu QAM. Z hlediska porovnání atmosférických jevů je nejhorším problémem mlha, která v případě husté mlhy zapříčiní úplnou ztrátu spojení. V případě deště tento problém nevzniká, ale také zapříčiňuje zhoršení

kvality modulace, a to především u složitějších formátů jako je 32QAM a 64QAM. Turbulence se jeví jako nejméně závažný jev zhoršující kvalitu daných modulací.

Z pohledu dalšího zkoumání by bylo vhodné tyto modulační schémata nasadit na reálný spoj a testovat jejich odolnost ve srovnání s laboratorními podmínkami. Také by bylo vhodné se zaměřit na vliv změny kvality modulace vůči symbolové či přenosové rychlosti a naprogramovat v Labview aplikaci pro měření bitové chybovosti, kterou by bylo zajímavé sledovat. V případě analýzy atmosférických jevů by stálo za důkladnější testování vlivu deště, u kterého by byly změřeny přesné rozměry kapek, a tak by byla patrnější závislost mezi velikostí kapky a zhoršením kvality modulace.

Použitá literatura

- [1] BOUCHET, O., H. SIZUN, Ch. BOISROBERT, F. FORNEL, P.N. FAVENNEC. *Free-Space Optics: Propagation and Communication*. 1st pub. London: ISTE, 2006, 219 p. ISBN 978-1-905209-02-6.
- [2] POPOOLA, Wasiu Oyewole. *Subcarrier intensity modulated free-space optical communication systems*. Newcastle, 2009. Doctor of Philosophy. University of Northumbria at Newcastle. Supervisor Msc. Zabih Ghasseemlooy, Ph.D.
- [3] LÁTAL, J., P. KOUDELKA, J. VITÁSEK. Měření vlivu velikosti překážek na přenos optickým pojítkem. *Elektrorevue*. 2010, svazek 12, č. 3, s. 9. ISSN 1213-1539.
- [4] ALKHOLIDI, A. G., K. S. ALTOWIJ. *Free Space Optical Communications — Theory and Practices* [online]. InTech, 2014, DOI: 10.5772/58884, 54 p.. ISBN 978-953-51-1732-2.
- [5] SALEH, B. E, M. C. TEICH. *Základy fotoniky*, svazek 1. Praha: Matfyzpress, 1994, 226 s. ISBN 978-808-5863-024.
- [6] HANTL, J. *Tvarování laserového svazku*. Brno, 2011. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Hudcová Lucie, Ph.D..
- [7] LÁTAL, J., T. DAVID, J. VITÁSEK, P. KOUDELKA. Měření optického výkonu pro optický svazek u bezvláknového optického pojítka. *Electroscope*. 2011, č. III. ISSN 1802-4564.
- [8] Laser gaussian profile [obrázek]. Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-. Dostupné z: en.wikipedia.org/wiki/Gaussian_beam%23/media/File:Laser_gaussian_profile.svg
- [9] Optics Theoretical Basics. Openspim [obrázek]. 2014 Dostupné z: http://openspim.org/SPIM_Optics_101/Theoretical_basics
- [10] JOCH, A. *Stanovení chybovosti optovláknového spoje*. Brno, 2008. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Martin Kyselák, Ph.D.
- [11] VODRÁŽKA, J. *Chybovost při přenosu digitálního signálu* [online]. Praha. Dostupné z: http://data.cedupoint.cz/oppa_e-learning/2_KME/059.pdf. Materiál pro e-learningovou výuku. České vysoké učení technické v Praze.
- [12] IVANIGA, P., L. MIKUŠ. Vztah mezi Q – faktorem a chybovostí v systémech DWDM. *Pandatron-elektrotechnický magazín* [online]. 2012. Dostupné z: <http://pandatron.cz/?2909>
- [13] MAJUMDAR, A. K., J. C. RICKLIN. *Free-space laser communications: principles and advances*. New York: Springer, 2008, 417 p. ISBN 978-0-387-28652-5.
- [14] ANDREWS, L. C., R. L. PHILLIPS. *Laser beam propagation through random media*. 2nd ed. Bellingham, SPIE Press, 2005, 782 p. ISBN 08-194-5948-8.
- [15] PROKEŠ, A. Atmospheric effects on availability of free space optics systems. *SPIE Optical Engineering*. 2009, vol. 48(6): 066001-. DOI: 10.1117/1.3155431. ISSN 0091-3286.
- [16] WILLEBRAND, H., B. S. GHUMAN. *Free-space optics: enabling optical connectivity in today's networks*. Indianapolis: SAMS, 2002, 259 p. ISBN 06-723-2248-X.

- [17] WILFERT, O. *Atmosférické optické spoje* [online]. Studijní materiál. Vysoké učení technické v Brně. Dostupné z: http://www.urel.feec.vutbr.cz/web_documents/studium/doc/dre2/optika.pdf
- [18] RAMIREZ-INIGUEZ, R., S. M. IDRUS, Z. SUN. *Optical wireless communications: IR for wireless connectivity*. Boca Raton: CRC Press, 2008, 344 p. ISBN 08-493-7209-7
- [19] MUHAMMAD, S.S., P. KOHLDORFER a E. LEITGEB. *Channel modeling for terrestrial free space optical links*. Proceedings of 2005 7th International Conference Transparent Optical Networks, vol. 1, p. 407-410. DOI: 10.1109/icton.2005.1505832, ISSN 2162-7339.
- [20] ZABIDI, S. A., I. M. RAFIQU, A. K. WAJDI. *Rain attenuation prediction of optical wireless system in tropical region*. 2013 IEEE International Conference on Smart Instrumentation, Measurement and Applications (ICSIMA). IEEE, 2013, p. 1-5. DOI: 10.1109/ICSIMA.2013.6717965. ISBN 978-1-4799-0843-1.
- [21] NADEEM, F., T. JAVORNIK, E. LEITGEB, V. KVICERA a G. KANDUS. *Continental Fog Attenuation Empirical Relationship from Measured Visibility Data*. Journal of Radio Engineering 2010, vol. 19 (4), p. 596 – 600, ISSN 1805-9600.
- [22] DORDOVÁ, L. *Metoda stanovení charakteristik atmosférického přenosového prostředí v optické oblasti spektra*. Brno, 2009. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Prof. Ing. Otakar Wilfert, CSc.
- [23] CÍSAŘ, D. *Vliv atmosférických turbulencí na intenzitní profil laserového svazku*. Brno, 2009. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Lucie Hudcová, Ph.D.
- [24] HOVOŘÁK, P. *Modelování turbulentní atmosféry a snižování fluktuací přijímaného signálu vícesvazkovým provozem*. Vysoké učení technické v Brně. 2002. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/02067/index.html#Turbulence>
- [25] Český hydrometeorologický úřad: *Vysvětlení meteorologických pojmů a jevů* [online]. Dostupné z: http://portalk.chmi.cz/portal/dt?portal_lang=cs&menu=JSPTabContainer/P3_0_Informace_pro_Vas/P3_11_Terminologie/P3_11_3_Dalsi_pojmy_2&last=false
- [26] Aviation meteorology: *Air Turbulence* [online]. [cit. 2015-06-01]. Dostupné z: <http://www.aviamet.gr/cms.jsp?moduleId=015&extLang=LG>
- [27] MAJUMDAR, A. K. *Advanced free space optics (FSO)*. USA: Springer, 201. ISBN 978-149-3909-179.
- [28] ELGANIMI, T. Y. *Studying the BER Performance, Power- and Bandwidth- Efficiency for FSO Communication Systems under Various Modulation Schemes*. AEECT, 2013. DOI: 978-1-4799-2303-8/13.
- [29] VITÁSEK, J. *Optické atmosférické komunikace*. Ostrava, 2014. Skripta. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava.
- [30] GUIMARÃES, D. A. *Digital transmission - a simulation-aided introduction with VisSim/Comm*. London: Springer, 2009, 872 p. ISBN 36-420-1358-9.

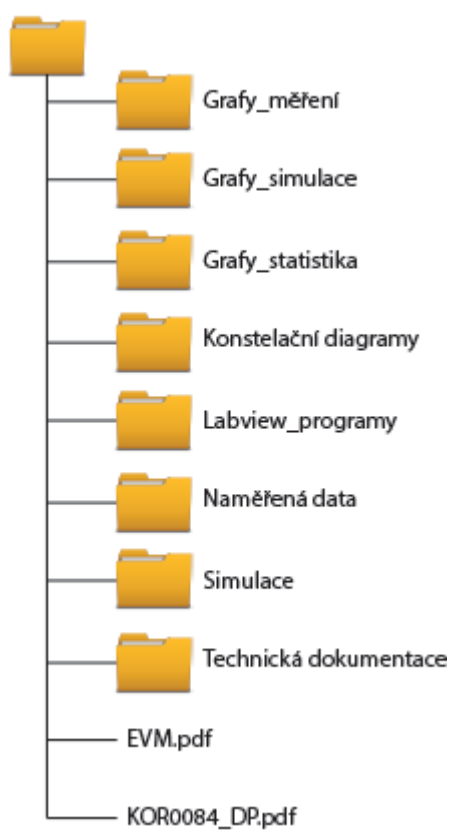
- [31] Circuit Design [obrázek]: *Modulation PSK*. Circuit Design [online]. Dostupné z: http://www.cdt21.com/resources/Modulation/modulation_PSK.asp
- [32] WAY, W., *What's The Difference Between PAM And QAM In Optical Fiber Links.. NeoPhotonics* [online]. 2015. Dostupné z: <http://blog.neophotonics.com/whats-the-difference-between-pam-and-qam-in-optical-fiber-links/>
- [33] SALEH, B. E., M. C. TEICH. *Základy fotoniky: svazek 2*. Praha: Matfyzpress, 1994, 226 s. ISBN 978-808-5863-024.
- [34] BORN, M., E. WOLF. *Principles of optics: electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light*. 7th ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1999, 952 p. ISBN 05-216-4222-1.
- [35] GOLDSTEIN, D. H. *Polarized light*. 3rd ed. CRC Press, 2010. ISBN 978-1-4398-3040-6.
- [36] Wikipedia [obrázek]: Polarizace. Wikipedia [online]. 2015. Dostupné z: [http://www.wikiwand.com/cs/Polarizace_\(elektrodynamika\)](http://www.wikiwand.com/cs/Polarizace_(elektrodynamika))
- [37] Wikipedia [obrázek]: Polarization. Wikipedia [online]. 2015. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Polarization_\(waves\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Polarization_(waves))
- [38] Newport [obrázek]: Newport: Polarization in Fiber Optics [online]. Dostupné z: <http://www.newport.com/Tutorial-Polarization-in-Fiber-Optics/849671/1033/content.aspx>
- [39] An optical transmitter for every need [obrázek]. *Lightwave* [online]. 2014. Dostupné z: <http://www.lightwaveonline.com/articles/print/volume-31/issue-2/features/an-optical-transmitter-for-every-need.html>
- [40] Modulation Error Ratio (MER) and Error Vector Magnitude (EVM). *National Instruments* [online]. 2014. Dostupné z: <http://www.ni.com/white-paper/3652/en/>
- [41] HOREVAJ, M. Chyby diskrétních modulací. [online]. Přednáškové materiály. České vysoké učení technické v Praze. Dostupné z: http://horevaj.com/horevaj/11_files/5.pdf
- [42] NI USB-6001: Specifications. *National Instrument* [online]. Dostupné z: <http://www.ni.com/pdf/manuals/374369a.pdf>
- [43] Meteorologické prvky a jejich klimatologické charakteristiky. *Klimatologie a hydrogeografie pro učitele* [online]. Brno, 2014. Masarykova univerzita v Brně. ISSN: 1802-128X. Dostupné z: http://is.muni.cz/do/rect/el/estud/pedf/ps14/fyz_geogr/web/pages/03-prvky.html
- [44] HYPRO FP series: Specifications. *Hypro*. [online]. Dostupné z: http://www.hypro-ind.co.uk/images/full_cone.pdf
- [45] Suchý led. *Linde Gas*. [online]. Dostupné z: http://www.linde-gas.cz/cs/produkty_and_zasobovani/suchy_led/index.html
- [46] NABOULSI, A., H. SIZUN, F. FORNEL. *Propagation of optical and infrared waves in the atmosphere*. New Delhi: URSI, 2005. 4 p. Dostupné z: [http://www.ursi.org/proceedings/procga05/pdf/F01P.7\(01729\).pdf](http://www.ursi.org/proceedings/procga05/pdf/F01P.7(01729).pdf)

Seznam příloh

Příloha A:	Použité přístroje.....	i
Příloha B:	Velké tabulky	ii
Příloha C:	Velké grafy	viii

Příloha na CD/DVD.

Adresářová struktura přiloženého CD/DVD:



Příloha A: *Použité přístroje*

Tabulka A.1: Seznam použitých přístrojů

Aktivní chladič LD	Thorlabs TCLDM9-TE
Anemometr	VOLTCRAFT PL-135HAN
Čerpadlo	Gardena 5000/5
Detekční karta LD záření	Thorlabs VRC2
Elektronický regulátor	Siemens SSD31
Fotodetektor	Thorlabs PDA10A-EC
Generátor mlhy	Antari F-80Z
Konstrukční prvky	Thorlabs
LD 1550 nm	Thorlabs ML925B45F
LD 650 nm	UNION OPTRONICS 650543A
LD 850nm	Thorlabs L850P010
Polarimetr	Thorlabs TXP 5004
Proudový driver	Thorlabs LDC205C
Průtokoměr	Biotech 150189
Snímací hlavice polarimetru	Thorlabs PAN5710IR3
Softwarově definované rádio	NI USRP 2920
Teplotní driver	Thorlabs TED200C
Teplotní ohřívač	SOLAC TH8325
Teplotní ohřívač	EMPIRE CTH-5000
Tlakoměr	B+B Sensors DRTR-AL
Trysky	HYPRO FP series 90B2FP6.5, 90B1FP3.5, 90B1FP1.0
USB karta pro získávání a zápis dat	NI DAQ USB 6001

Použité programy:

- Labview 14
- Matlab R2014a
- Optisystem 14
- Polarimeter
- Statgraphics Centurion XVI

Příloha B: Velké tabulky

Tabulka B.1: Měření turbulencí 650 nm

	Krok	MER (dB)																	
		1_1	1_2	1_3	2_1	2_2	2_3	3_1	3_2	3_3	4_1	4_2	4_3	5_1	5_2	5_3	6_1	6_2	6_3
QPSK	Průměr	23,98	23,90	23,92	23,73	23,47	23,84	23,23	23,34	23,45	23,15	23,13	23,36	23,05	23,05	23,21	22,65	22,13	22,38
	Směr. odch.	1,21	0,80	0,66	0,59	0,44	0,34	1,06	0,75	0,61	1,03	0,83	0,67	1,03	0,83	0,67	1,19	1,05	0,93
$\pi/4$ DQPSK	Průměr	24,03	23,89	23,90	23,78	23,74	23,82	23,34	23,42	23,48	23,18	23,16	23,33	23,09	23,08	23,24	22,65	22,14	22,39
	Směr. odch.	1,13	0,84	0,68	0,57	0,47	0,46	1,00	0,72	0,62	1,03	0,87	0,67	1,03	0,87	0,67	1,21	1,10	0,93
8PSK	Průměr	24,03	23,90	23,95	23,79	23,74	23,83	23,25	23,39	23,46	23,13	23,14	23,28	23,06	23,06	23,21	22,59	22,09	22,39
	Směr. odch.	1,16	0,84	0,64	0,53	0,49	0,39	1,09	0,75	0,63	1,04	0,85	0,69	1,04	0,85	0,69	1,22	1,16	0,93
16PSK	Průměr	23,97	23,85	23,83	23,77	23,72	23,74	23,28	23,38	23,48	23,13	23,13	23,26	23,07	23,07	23,20	22,50	22,08	22,03
	Směr. odch.	1,19	1,05	0,97	0,57	0,46	0,51	1,02	0,73	0,60	1,02	0,83	0,68	1,02	0,83	0,68	1,19	1,15	0,99
4QAM	Průměr	23,95	23,86	23,87	23,75	23,69	23,67	23,27	23,38	23,47	23,10	23,13	23,26	23,03	23,06	23,19	22,49	22,06	22,39
	Směr. odch.	1,14	0,82	0,68	0,57	0,47	0,59	1,00	0,71	0,61	1,07	0,84	0,67	1,07	0,85	0,67	1,11	1,14	0,88
16QAM	Průměr	23,25	23,18	23,16	23,02	23,00	23,04	22,72	22,80	22,98	22,82	22,79	22,88	22,76	22,73	22,81	21,89	21,59	21,84
	Směr. odch.	0,93	0,68	0,55	0,47	0,43	0,51	0,90	0,80	0,58	0,89	0,75	0,65	0,89	0,75	0,65	1,04	0,98	0,82
32QAM	Průměr	23,20	23,04	22,93	23,06	23,04	22,96	22,67	22,89	22,95	22,76	22,72	22,83	22,70	22,65	22,77	21,47	21,12	21,47
	Směr. odch.	3,46	3,52	3,67	0,58	0,50	0,93	1,44	0,90	0,79	1,32	1,20	0,95	1,31	1,21	0,95	2,46	2,56	2,11
64QAM	Průměr	21,42	21,61	22,11	21,34	21,36	20,03	16,98	16,80	16,97	16,32	16,34	16,63	16,26	16,28	16,52	13,87	13,71	13,94
	Směr. odch.	4,95	4,65	4,50	3,62	4,21	4,95	6,26	6,29	6,37	6,27	6,20	6,22	6,27	6,18	6,21	5,04	4,95	5,08

Tabulka B.2: Měření turbulencí 850 nm

	Krok	MER (dB)																	
		1_1	1_2	1_3	2_1	2_2	2_3	3_1	3_2	3_3	4_1	4_2	4_3	5_1	5_2	5_3	6_1	6_2	6_3
QPSK	Průměr	23,48	23,54	23,70	22,85	22,91	23,15	22,77	22,85	22,82	22,53	22,62	22,93	22,09	22,26	22,32	21,67	22,17	22,23
	Směr. odch.	0,66	0,49	0,38	1,16	0,85	0,64	1,15	0,91	1,45	1,27	0,96	0,74	1,18	0,97	1,39	1,69	1,15	1,01
$\pi/4$ DQPSK	Průměr	23,61	23,57	23,70	23,01	22,98	23,17	22,89	22,85	22,86	22,66	22,62	22,95	22,05	22,29	22,41	22,01	22,10	22,19
	Směr. odch.	0,59	0,51	0,39	1,04	0,84	0,66	1,06	0,97	0,83	1,24	0,97	0,72	1,20	1,01	1,36	1,56	1,24	1,03
8PSK	Průměr	23,59	23,54	23,70	22,95	22,96	23,15	22,83	22,86	22,91	22,62	22,55	22,96	22,13	22,26	22,43	21,91	22,15	22,25
	Směr. odch.	0,59	0,50	0,39	1,11	0,86	0,66	1,09	0,94	0,82	1,22	1,03	0,72	1,21	0,99	1,32	1,58	1,18	1,00
16PSK	Průměr	23,58	23,55	23,69	22,96	22,97	23,17	22,85	22,85	22,89	22,60	22,61	22,85	22,13	22,28	22,46	22,00	22,09	22,18
	Směr. odch.	0,60	0,51	0,36	1,07	0,81	0,64	1,13	0,93	0,82	1,25	0,94	0,81	1,18	0,97	1,31	1,56	1,19	1,05
4QAM	Průměr	23,60	23,54	23,67	23,01	22,93	23,15	22,91	22,80	22,86	22,58	22,60	22,88	22,07	22,31	22,37	22,10	21,99	22,21
	Směr. odch.	0,56	0,50	0,39	1,03	0,85	0,64	1,00	0,95	0,83	1,23	0,95	0,74	1,16	0,97	1,39	1,47	1,30	1,02
16QAM	Průměr	23,50	23,46	23,57	22,91	22,86	23,05	22,82	22,79	22,81	22,55	22,58	22,80	22,01	22,23	22,32	22,00	22,00	22,17
	Směr. odch.	0,57	0,47	0,37	1,05	0,79	0,63	1,01	0,89	0,80	1,19	0,95	0,73	1,17	0,95	1,37	1,54	1,24	0,99
32QAM	Průměr	23,50	23,41	23,53	22,64	22,73	22,99	22,61	22,60	22,70	22,36	22,44	22,73	21,69	22,03	22,10	21,67	21,61	21,90
	Směr. odch.	0,72	0,63	0,44	1,77	1,21	0,87	1,74	1,56	1,25	2,01	1,40	1,04	2,28	1,72	2,33	2,66	2,43	1,83
64QAM	Průměr	20,60	20,18	20,33	18,74	18,66	19,21	18,81	18,35	18,61	18,36	18,12	18,41	17,16	17,24	18,10	17,61	16,99	17,03
	Směr. odch.	5,28	5,50	5,46	5,81	5,82	5,72	5,80	5,82	5,77	5,92	5,96	5,90	5,88	5,89	5,91	5,90	5,86	5,93

Tabulka B.3: Diference mezi referenčním a turbulentním prostředím

	Krok	MER (dB)																	
		1_1	1_2	1_3	2_1	2_2	2_3	3_1	3_2	3_3	4_1	4_2	4_3	5_1	5_2	5_3	6_1	6_2	6_3
QPSK	650 nm	0,29	0,37	0,35	0,54	0,80	0,42	1,04	0,92	0,82	1,11	1,14	0,91	1,21	1,21	1,06	1,62	2,14	1,89
	850 nm	0,54	0,48	0,32	1,17	1,11	0,87	1,25	1,17	1,20	1,49	1,40	1,09	1,93	1,76	1,70	2,35	1,85	1,79
$\pi/4$ DQPSK	650 nm	0,30	0,44	0,42	0,55	0,59	0,51	0,99	0,90	0,85	1,15	1,17	1,00	1,23	1,25	1,09	1,68	2,18	1,94
	850 nm	0,57	0,61	0,48	1,17	1,20	1,01	1,29	1,33	1,32	1,52	1,56	1,23	2,13	1,89	1,77	2,17	2,08	1,99
8PSK	650 nm	0,26	0,39	0,34	0,50	0,55	0,46	1,04	0,90	0,83	1,16	1,15	1,01	1,24	1,23	1,08	1,70	2,20	1,91
	850 nm	0,55	0,60	0,44	1,19	1,18	0,99	1,31	1,28	1,23	1,52	1,59	1,18	2,01	1,88	1,71	2,23	1,99	1,89
16PSK	650 nm	0,32	0,44	0,46	0,52	0,57	0,56	1,02	0,92	0,82	1,16	1,17	1,03	1,22	1,23	1,09	1,79	2,22	2,26
	850 nm	0,60	0,63	0,49	1,22	1,21	1,01	1,33	1,33	1,29	1,58	1,57	1,33	2,05	1,90	1,72	2,18	2,09	2,00
4QAM	650 nm	0,35	0,43	0,42	0,55	0,60	0,62	1,02	0,91	0,82	1,19	1,16	1,03	1,26	1,23	1,10	1,80	2,23	1,90
	850 nm	0,53	0,59	0,46	1,12	1,20	0,98	1,22	1,33	1,27	1,55	1,53	1,25	2,06	1,82	1,76	2,03	2,14	1,92
16QAM	650 nm	0,28	0,35	0,37	0,51	0,53	0,49	0,81	0,73	0,55	0,71	0,74	0,65	0,77	0,80	0,72	1,64	1,94	1,69
	850 nm	0,44	0,48	0,37	1,03	1,08	0,89	1,12	1,15	1,13	1,39	1,36	1,14	1,93	1,71	1,62	1,94	1,94	1,77
32QAM	650 nm	0,09	0,24	0,36	0,23	0,25	0,33	0,61	0,40	0,33	0,53	0,56	0,45	0,59	0,63	0,52	1,81	2,16	1,81
	850 nm	0,57	0,66	0,54	1,43	1,34	1,08	1,46	1,47	1,37	1,71	1,63	1,34	2,38	2,04	1,97	2,40	2,46	2,17
64QAM	650 nm	1,77	1,58	1,09	1,86	1,83	3,17	6,22	6,40	6,22	6,87	6,85	6,57	6,93	6,91	6,67	9,33	9,48	9,25
	850 nm	1,33	1,75	1,60	3,19	3,27	2,72	3,12	3,58	3,32	3,57	3,81	3,52	4,77	4,69	3,83	4,32	4,94	4,90

Tabulka B.4: Měření vlivu deště

		MER (dB)											
		650 nm						850 nm					
Typ deště		Hrubý déšť		Jemný déšť		Mrholení		Hrubý déšť		Jemný déšť		Mrholení	
Otevření ventilu		100%	50%	100%	50%	100%	50%	100%	50%	100%	50%	100%	50%
QPSK	Průměr	14,82	15,84	11,02	12,94	16,28	18,03	15,13	16,45	12,96	13,79	17,44	18,62
	Směr. odch.	5,07	5,50	1,98	2,79	2,55	3,09	4,01	4,51	1,55	1,87	1,61	1,77
$\pi/4$ DQPSK	Průměr	15,02	15,85	11,25	12,54	14,1	16,99	15,13	15,92	13,20	13,97	17,24	18,81
	Směr. odch.	5,03	5,57	1,99	2,52	2,19	2,98	3,96	4,95	1,19	1,75	1,66	1,44
8PSK	Průměr	14,94	15,74	11,28	12,46	15,56	17,57	15,11	16,26	12,72	13,62	17,85	18,90
	Směr. odch.	5,08	5,59	2,18	2,47	2,47	3,07	4,04	4,73	2,91	1,89	1,39	1,58
16PSK	Průměr	14,87	16,02	10,54	12,25	15,77	17,45	15,09	15,89	11,27	13,06	17,04	18,55
	Směr. odch.	5,05	5,63	2,49	2,73	2,48	3,00	4,06	4,91	1,49	1,79	2,95	1,46
4QAM	Průměr	14,86	15,83	10,56	12,54	16,1	16,76	15,20	16,12	13,12	14,40	18,17	19,08
	Směr. odch.	5,10	5,76	2,31	2,51	2,59	2,99	3,89	5,01	1,79	1,76	1,28	1,42
16QAM	Průměr	14,68	15,82	8,77	10,41	15,58	15,07	14,74	15,74	9,89	12,08	16,83	17,91
	Směr. odch.	5,48	5,96	4,19	4,38	3,87	4,37	5,32	6,13	4,31	4,23	3,95	1,82
32QAM	Průměr	13,28	14,68	8,35	9,16	12,41	14,43	13,33	14,73	9,02	10,12	13,90	15,34
	Směr. odch.	6,06	6,50	2,65	3,70	5,04	5,45	5,11	6,03	2,47	3,68	4,86	4,76
64QAM	Průměr	12,41	12,59	10,1	10,43	12,38	12,32	12,70	12,80	11,05	11,27	12,87	12,91
	Směr. odch.	4,84	4,98	2,38	2,64	4,08	3,75	3,39	4,36	1,70	2,33	2,28	3,14

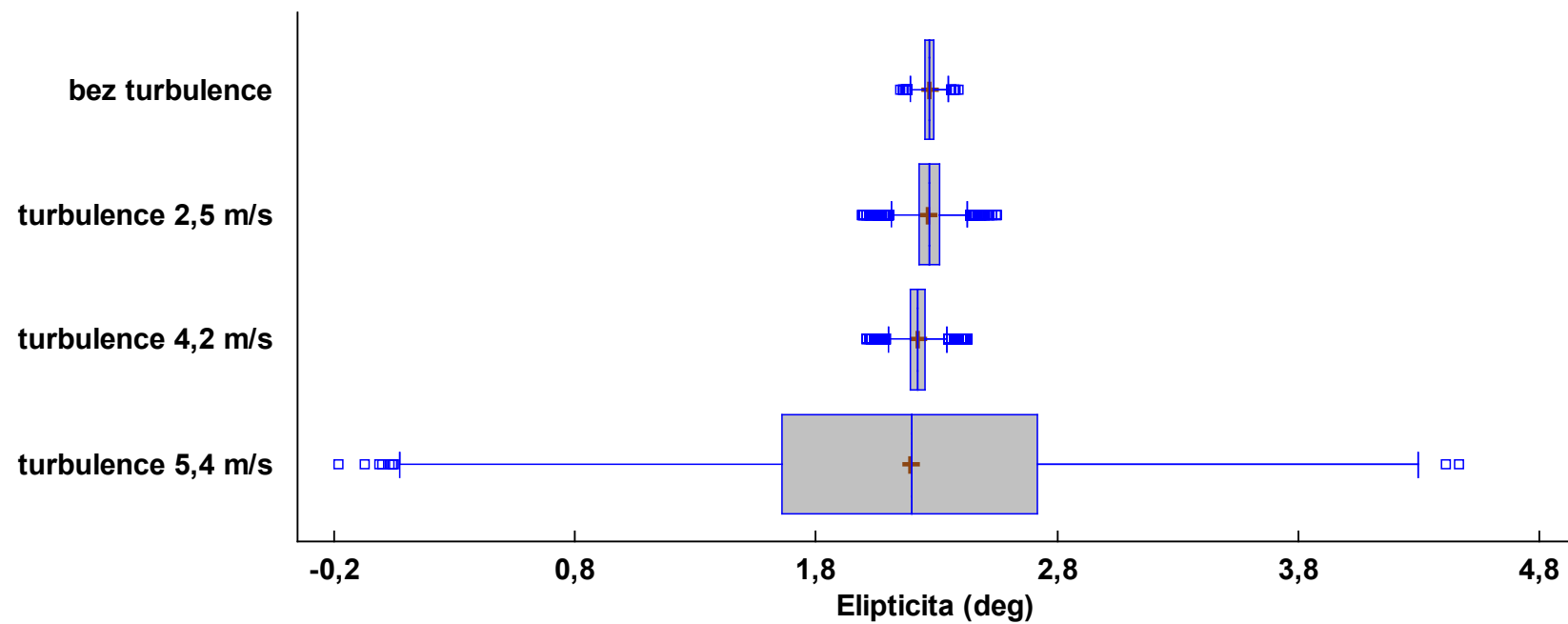
Tabulka B.5: Vliv deště na změnu polarizace, elipticita

		Elipticita (deg)					
		Hrubý déšť		Jemný déšť		Mrholení	
		100%	50%	100%	50%	100%	50%
QPSK	Průměr	2,30	2,17	3,19	1,84	2,13	2,31
	Směr. odch.	1,37	1,41	1,22	0,92	0,93	1,00
$\pi/4$ DQPSK	Průměr	2,27	2,13	3,19	1,84	2,13	2,32
	Směr. odch.	1,32	1,38	1,21	0,91	0,94	0,98
8PSK	Průměr	2,31	2,19	3,21	1,83	2,12	2,33
	Směr. odch.	1,31	1,40	1,24	0,97	1,03	1,01
16PSK	Průměr	2,29	2,19	3,22	1,85	2,11	2,32
	Směr. odch.	1,28	1,42	1,19	0,97	0,95	1,02
4QAM	Průměr	2,31	2,17	3,18	1,83	2,12	2,33
	Směr. odch.	1,29	1,41	1,21	0,92	1,00	0,99
16QAM	Průměr	2,28	2,18	3,16	1,85	2,13	2,33
	Směr. odch.	1,31	1,41	1,10	0,96	0,98	0,98
32QAM	Průměr	2,30	2,18	3,18	1,86	2,13	2,33
	Směr. odch.	1,29	1,42	1,10	0,89	0,97	0,96
64QAM	Průměr	2,31	2,15	3,18	1,84	2,15	2,36
	Směr. odch.	1,30	1,41	1,10	0,91	0,97	0,95

Tabulka B.6: Vliv deště na změnu polarizace, azimut

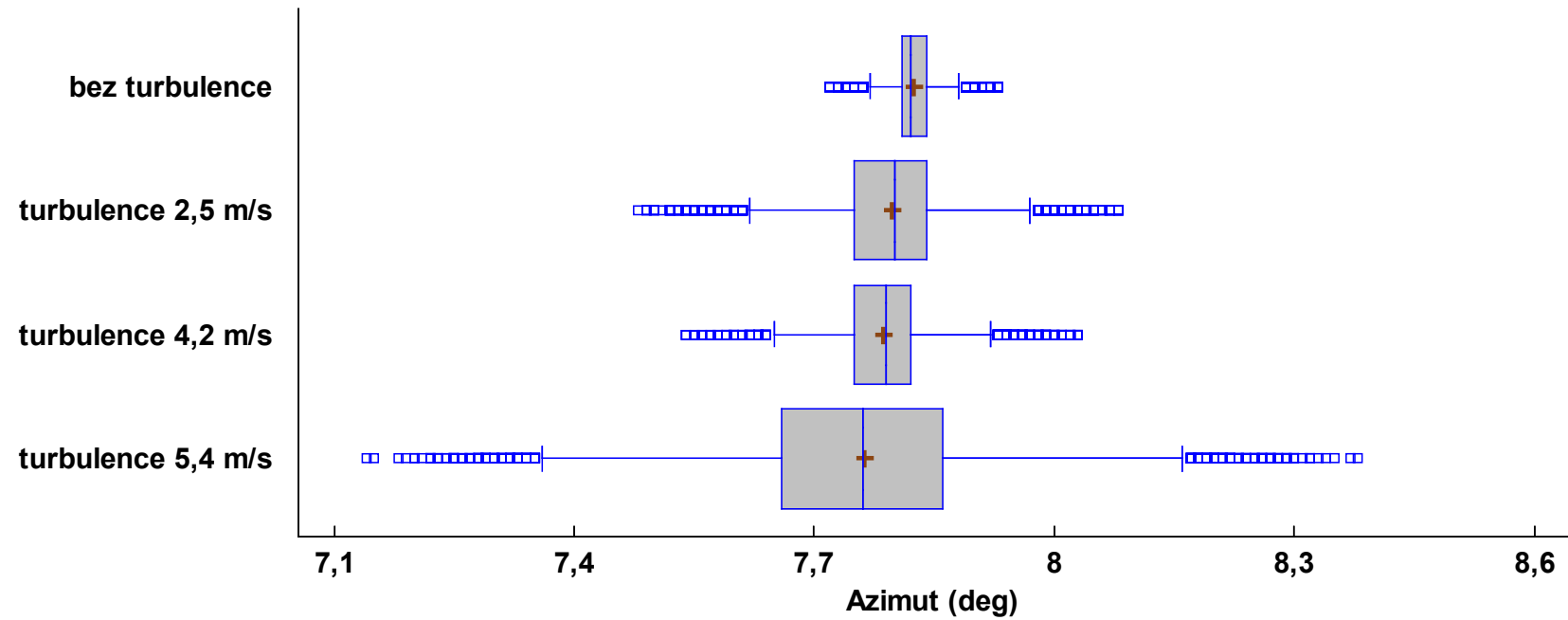
		Azimut (deg)					
		Hrubý déšť		Jemný déšť		Mrholení	
		100%	50%	100%	50%	100%	50%
QPSK	Průměr	8,10	7,98	7,96	8,32	8,01	8,03
	Směr. odch.	3,46	3,52	2,82	2,18	1,92	2,11
$\pi/4$ DQPSK	Průměr	8,12	8,05	7,94	8,34	8,03	8,08
	Směr. odch.	3,29	3,51	2,83	2,11	1,99	2,10
8PSK	Průměr	8,06	8,05	7,96	8,34	8,04	8,07
	Směr. odch.	3,22	3,53	2,90	2,25	2,16	2,12
16PSK	Průměr	8,05	8,07	7,94	8,32	8,08	8,04
	Směr. odch.	3,30	3,52	2,47	2,27	1,99	2,13
4QAM	Průměr	8,02	8,00	7,99	8,33	8,08	8,01
	Směr. odch.	3,25	3,54	2,74	2,16	2,06	2,07
16QAM	Průměr	8,12	8,01	8,00	8,36	8,05	8,05
	Směr. odch.	3,33	3,51	2,34	2,16	2,03	2,05
32QAM	Průměr	8,09	8,01	8,01	8,38	8,04	8,07
	Směr. odch.	3,23	3,51	2,40	2,10	2,01	2,04
64QAM	Průměr	8,03	8,05	8,00	8,34	8,04	8,05
	Směr. odch.	3,28	3,46	2,35	2,08	2,03	2,01

Krabicový graf elipticity dle turbulence



Obrázek C.1: Krabicový graf elipticity

Krabicový graf azimutu dle turbulence



Obrázek C.2: Krabicový graf azimutu